



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ POMOCÍ
PROGRAMU LABVIEW**

MEASUREMENT OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS USING LABVIEW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Šolc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Šolc

ID: 173759

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Měření magnetických vlastností materiálů pomocí programu LabVIEW

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s programem LabVIEW a postupy měření magnetických vlastností materiálů.
2. Sestavte měřicí řetězec a vytvořte měřicí program pro měření magnetických vlastností materiálů.
3. Na předložených vzorcích proveďte měření magnetických vlastností materiálů a měření vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.

[2] www.ni.com

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této práci je popsán program LabVIEW a jeho vývojové prostředí. Dále jsou rozebrána nejčastěji používaná čidla proudů, popsány principy jejich funkce a jejich vlastnosti. V další části práce se zabývám popisem integračních článků a jejich vlastnostmi. Poté se věnuji hysterezním křivkám feromagnetických materiálů. V praktické části bakalářské práce se zabývám měřením BH křivek pro toroidní transformátor, které jsem zrealizoval pomocí programu vytvořeném v LabVIEW, použitím digitální integrace v LabVIEW, integrace pomocí integračního RC článku a proudového čidla ITN 12-P Ultrastab. Na závěr se věnuji vyhodnocení provedeného měření.

Klíčová slova

LabVIEW; Čidla; Rogowskiho cívka; Hallova sonda; magnetický tok; magnetická indukce; transformátor; indukčnost, bočník; Integrační článek; RC článek; RL článek; BH křivka; Hysterezní křivka; Hystereze; Remanence; Koercivita; Digitální integrace; Analogová integrace

Abstract

In this thesis LabVIEW program and its development environment is described. After that the most used current transducers, their working principles and their properties are analyzed. Next part is dedicated to curves of magnetic hysteresis of ferromagnetic materials. Practical part of bachelor's thesis is dedicated to measuring BH curves of toroidal core transformer. The measuring was made possible by LabVIEW program, using digital integration in LabVIEW, analog integration with RC cell, voltage converter and current transducer ITN 12-P Ultrastab. In the last part of the bachelor's thesis I evaluate the measurements.

Keywords

LabVIEW; Transducers; Rogowski coil; Hall sensing head; magnetic flux; magnetic induction; transformer; indukčnost; shunt; Integration cell; RC cell; RL cell; BH curve; Hysteresis curve; Hysteresis; Remanence; Coercivity; Digital integration; Analog integration

Bibliografická citace

ŠOLC, M. *Měření magnetických vlastností materiálů pomocí programu LabVIEW* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Měření magnetických vlastností materiálů pomocí programu LabVIEW jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	1
2 PROGRAM LABVIEW	2
2.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ PROGRAMU LABVIEW	2
2.1.1 ČELNÍ PANEL	2
2.1.2 BLOKOVÝ DIAGRAM	2
2.1.3 SUBVI	4
2.1.4 DAQ DEVICE	4
3 ČIDLA PROUDU	5
3.1 VYUŽITÍ ČIDEL PROUDU	5
3.2 KRITÉRIA VÝBĚRU ČIDEL PROUDU	6
3.3 DĚLENÍ ČIDEL PROUDU	6
3.3.1 ČIDLA VYUŽÍVAJÍCÍ HALLOVY SONDY	6
3.3.2 ELEKTRONICKÁ TECHNOLOGIE	8
3.3.3 TECHNOLOGIE FLUXGATE	9
3.3.4 ČIDLO PROUDU ITN 12-P ULTRASTAB	10
3.3.5 ROGOWSKIHO CÍVKA	11
3.3.6 MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU	12
3.3.7 POUŽITÍ BOČNÍKU	13
4 INTEGRAČNÍ ČLÁNEK	14
5 MAGNETICKÁ HYSTEREZE	19
5.1 REMANENCE	20
5.2 MĚŘENÍ B-H KŘIVKY	22
5.3 MĚŘENÍ CELKOVÝCH MAGNETICKÝCH ZTRÁT	24
6 MĚŘENÍ	26
6.1 MĚŘENÉ VZORKY	26
6.2 POPIS MĚŘENÍ	26
6.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	29
7 ZÁVĚR	36
LITERATURA	37
PŘÍLOHY	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 - NÁSTROJOVÁ LIŠTA ČELNÍHO PANELU	2
OBRÁZEK 2 - BLOKOVÝ DIAGRAM A ČELNÍ PANEL	3
OBRÁZEK 3 - NÁSTROJOVÁ LIŠTA BLOKOVÉHO DIAGRAMU	4
OBRÁZEK 4 - PŘÍKLAD VYUŽITÍ FUNKCE SUBVI	4
OBRÁZEK 5 - PŘÍKLAD ČIDEL PROUDU [2]	5
OBRÁZEK 6 - HLAVA ČIDLA FLUXGATE DETEKUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE [3]	9
OBRÁZEK 7 - ROGOWSKIHO CÍVKA [3]	11
OBRÁZEK 8 - MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU A NAPĚTÍ [8]	12
OBRÁZEK 9 - PŘÍKLAD PROUDOVÉHO BOČNÍKU [9]	13
OBRÁZEK 10 - SCHÉMA ZAPOJENÍ PROUDOVÉHO BOČNÍKU	13
OBRÁZEK 11 - INTEGRAČNÍ RC ČLÁNEK	14
OBRÁZEK 13 - ÚTLUMOVÁ CHARAKTERISTIKA INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU [10]	16
OBRÁZEK 14 - LOG. AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA RC/RL ČLÁNKU [10]	16
OBRÁZEK 15 - FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU [10]	17
OBRÁZEK 16 - FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU [10]	18
OBRÁZEK 17 - PŘÍKLAD BH KŘIVKY MAGN. MĚKKÉHO A TVRDÉHO MATERIÁLU [11]	19
OBRÁZEK 18 - PŘÍKLAD B-H KŘIVEK PRO OCEL, ŽELEZO A VZDUCH [11]	19
OBRÁZEK 19 - HYSTEREZNÍ KŘIVKA [11]	21
OBRÁZEK 20 - SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ B-H KŘIVKY [12]	23
OBRÁZEK 21 - FREKVENČNÍ AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA [12]	23
OBRÁZEK 22 - MĚŘENÍ CELKOVÝCH MAGNETICKÝCH ZTRÁT WATTMETREM [12]	24
OBRÁZEK 23 - MĚŘENÍ CELK. MAGN. ZTRÁT. ELIMINACE ZTRÁT V MĚDI [12]	25
OBRÁZEK 24 - BLOKOVÝ DIAGRAM PROGRAMU PRO MĚŘENÍ A UKLÁDÁNÍ DAT	27
OBRÁZEK 25 - ČELNÍ PANEL PROGRAMU PRO MĚŘENÍ A UKLÁDÁNÍ DAT	28
OBRÁZEK 26 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,1$ A (VZOREK 1)	31
OBRÁZEK 27 - ANALOGOVÁ A DIGITÁLNÍ BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,2$ A (VZOREK 1)	31
OBRÁZEK 28 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,5$ A (VZOREK 1)	31
OBRÁZEK 29 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1$ A (VZOREK 1)	32
OBRÁZEK 30 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1,5$ A (VZOREK 1)	32
OBRÁZEK 32 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,1$ A (VZOREK 2)	32
OBRÁZEK 31 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,2$ A (VZOREK 2)	33
OBRÁZEK 33 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,5$ A (VZOREK 2)	33
OBRÁZEK 34 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1$ A (VZOREK 2)	33
OBRÁZEK 36 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1,5$ A (VZOREK 2)	34
OBRÁZEK 35 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,1$ A (VZOREK 3)	34
OBRÁZEK 37 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,2$ A (VZOREK 3)	34
OBRÁZEK 38 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 0,5$ A (VZOREK 3)	35
OBRÁZEK 39 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1$ A (VZOREK 3)	35
OBRÁZEK 40 - BH KŘIVKA PRO $I_{EF} = 1,5$ A (VZOREK 3)	35
OBRÁZEK 41 - MĚŘENÝ VZOREK TOROIDNÍHO TRANSFORMÁTORU	38
OBRÁZEK 42 - MĚŘENÝ VZOREK TOROIDNÍHO TRANSFORMÁTORU	38
OBRÁZEK 43 - MĚŘENÝ VZOREK TOROIDNÍHO TRANSFORMÁTORU	38

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 - ELEKTRICKÉ PARAMETRY [6].....	10
TABULKA 2 – PARAMETRY TOROIDNÍCH TRANSFORMÁTORŮ.....	26
TABULKA 3 - CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE (VZOREK 1).....	30
TABULKA 4 - CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE (VZOREK 2).....	30
TABULKA 5 - CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE (VZOREK 3).....	30

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	střídavý proud
B	magnetická indukce
B_{ext}	magnetická indukce externího pole
B_r	remanentní indukčnost
B_{si}	magnetická indukce způsobená proudem I_{si}
DC	stejnoseměrný proud
d_i	posun fází
f_m	napájecí kmitočet
f_h	horní mezní kmitočet
F	frekvence
F_i	chyba měření
φ	fázový posun
H	intenzita magnetického pole
H_c	koercivita
i	proud
I	stejnoseměrný proud destičkou
I_c	velikost odebíraného proudu
I_{dyn}	dynamický proud
I_N	jmenovitá hodnota proudu
I_p	proud primární cívky
I_{PM}	efektivní jmenovitá hodnota primárního proudu
I_{PN}	jmenovitá hodnota stejnosměrného proudu
\hat{I}_p	maximální hodnota přetížení
I_s	sekundární proud
I_s	vyrovnávací proud
I_{s1}/I_{s2}	výstupní proudy
I_{SN}	efektivní jmenovitá hodnota sekundárního proudu
I_{th}	krátkodobý oteplovací proud
k	konstanta definující materiál a tloušťku destičky
K_N	převodní poměr
L	indukčnost
l_{Fe}	střední délka železa
l_m	délka střední linie cívky
m	váha
M	vzájemná indukčnost cívky
N	počet závitů cívky
N_p, N_1	počet závitů primárního vinutí
N_s, N_2	počet závitů sekundárního vinutí
P	výkon

Ψ	spřažený magnetický tok
R	odpor
R_S	rezistence sekundární cívky
S	plocha průřezu plochy cívky
S_{Fe}	plocha průřezu feromagnetického jádra
S_N	komplexní výkon
T_A	okolní provozní teplota
τ	časová konstanta
U_C	velikost napájecího napětí
u_c	napětí na kondenzátoru
u_L	napětí na indukčnosti
μ_0	permeabilita vakua
X_c	kapacitance
X_L	induktance

1 Úvod

Cílem této práce je seznámit se s programem LabVIEW od americké firmy National Instruments (NI). Tato firma je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace. Prostředí LabVIEW využívá jednoduchý grafický jazyk, který je vhodný nejen k vytváření programů pro měření a analýzu signálů, ale také řízení, vizualizaci procesů všech složitostí a programování i velmi složitých zařízení, jako je například robot. Program LabVIEW má tedy všestranné využití.

Tento program vznikl z velké části za jediným účelem, a to nahradit prostorově, finančně a časově náročné využití technických prostředků virtuálním řešením za pomoci software a pomocí grafických a vizuálních prostředků umožnit uživateli vysokou jednoduchost ovládání a zajistit maximální názornost. Pomocí LabVIEW je umožněno rychle a jednoduše navrhnout a konfigurovat nové aplikace, což je za pomoci reálných mechanických součástí jak materiálově, tak i časově velmi náročné. [1]

LabVIEW používá i vlastní označení souborů, se kterými pracuje a kterým se říká virtuální instrumenty, zkráceně VI. Název programu poté může vypadat následovně: *prevod_C_na_F.vi*. [1]

V další části práce čtenáře seznamuji s nejznámějšími druhy proudových čidel, jejich pracovním principem a jejich výhodami/nevýhodami. Za posledních několik let se proudová čidla velmi rozvinula. Nejvíce se budu věnovat čidlům od firmy LEM, jelikož jejich čidlo jsem v bakalářské práci použil a jelikož jsou v aktuální době jedny z nejpřesnějších proudových čidel na trhu.

Poté se věnuji popisu integračních článků, jejich vlastnostem, charakteristikám a následnému použití při měření hysterezních křivek magnetických materiálů. Hysterezní křivky jsou důležitým ukazatelem při zjišťování vlastností a parametrů feromagnetických materiálů.

V poslední části bakalářské práce se věnuji měření hysterezních křivek toroidního transformátoru pomocí integračního článku a programu LabVIEW, respektive analogovou a digitální metodou. Také jsou zde měřeny ztráty v železe.

2 PROGRAM LABVIEW

2.1 Uživatelské rozhraní programu LabVIEW

Nyní si představíme základní prvky programu a možnosti použití. Rozhraní programu v LabVIEW má obvykle podobu čelního ovládacího panelu určitého měřicího přístroje. Proto se také program vytvořený v LabVIEW nazývá VI, což znamená virtuální (zdánlivý) přístroj. Základní prostředí programu je tvořeno dvěma okny, čelním panelem a blokovým diagramem. Čelní panel je uživatelské rozhraní a blokový diagram je zdrojovým kódem VI.

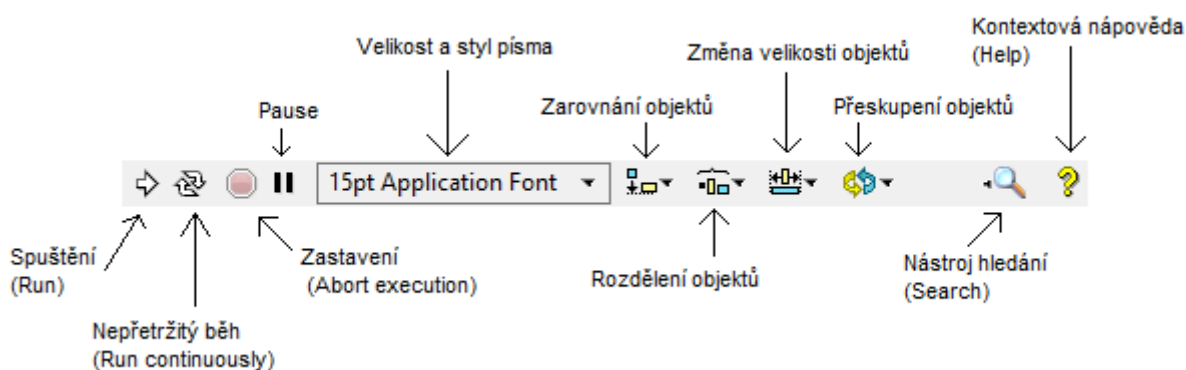
2.1.1 Čelní panel

V tomto panelu můžeme sledovat vzhled a chování zvolené aplikace. Lze v něm měnit parametry aplikace přes různé prvky jako identifikátory či ovladače a řídit celý běh aplikace či například graficky zobrazovat získané výsledky. Je v něm možné hýbat se všemi prvky VI, nastavovat parametry těchto prvků nebo měnit jejich velikost. [1]

Všechny tyto objekty mají vstupy a výstupy, které záleží na podstatě těchto objektů. Vstupy mohou mít mnoho podob, jako například ovladače či tlačítka. Výstupy jsou například zobrazovače, kontrolky či textové indikátory. Každému prvku lze přidat popisek (Label), který slouží k jeho pojmenování. [1]

2.1.1.1 Nástrojová lišta čelního panelu

Nástrojová lišta programu slouží k ovládání chodu programu. V této liště můžeme spouštět jeden cyklus program, opakovaný chod programu či program zastavovat a vyhledávat chyby v programu. Také zde můžeme využít funkcí zarovnání bloků, nástroje hledání či kontextové nápovědy (Help).

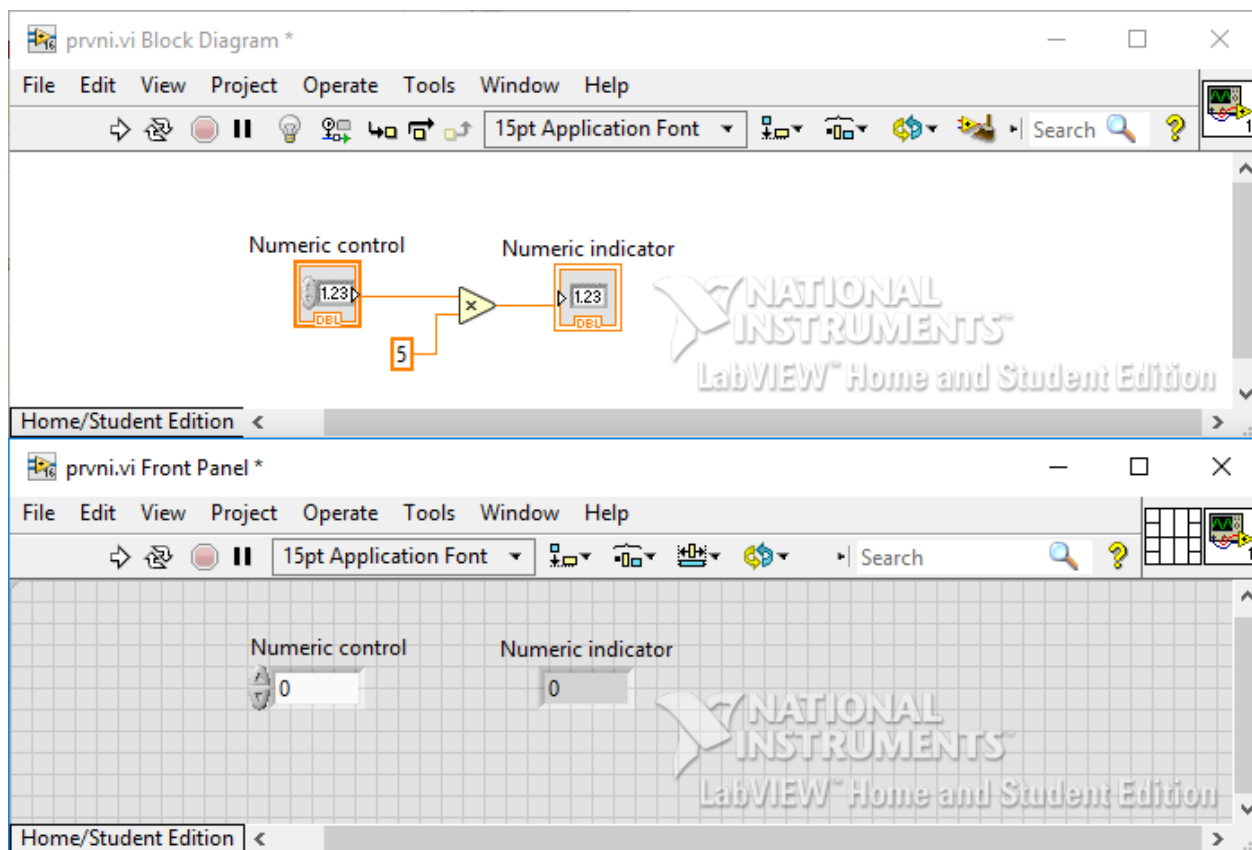


Obrázek 1 - Nástrojová lišta čelního panelu

2.1.2 Blokový diagram

Tato obrazovka je druhým hlavním oknem programu. Mezi čelním panelem a blokovým diagramem je možné přecházet klávesovou zkratkou <Ctrl+E>. Zde si může uživatel nadefinovat vlastní algoritmus programu. Cokoliv vytvoříme na čelním panelu se analogicky

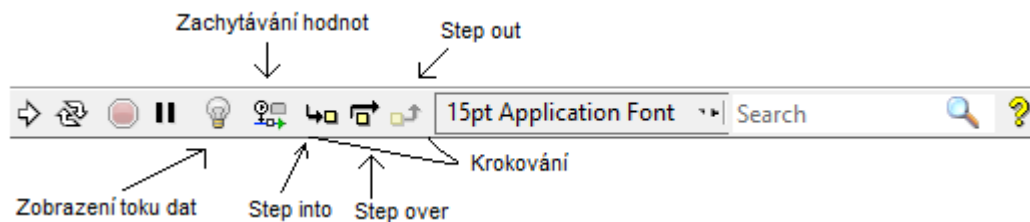
zobrazí v blokovém diagramu viz obrázek 2. Všechny prvky blokového diagramu mají podle své funkce nadefinovány vstupní či výstupní připojovací body. Všechny body lze propojit datovým spojem s ostatními prvky pomocí připojovacího nástroje. Pokud bod není zapojen, má bílou barvu, zapojený bod má šedou barvu a černou bod korespondující s vybraným prvkem. [1]



Obrázek 2 - Blokový diagram a čelní panel

2.1.2.1 Nástrojová lišta blokového diagramu

Obdobně jako u nástrojové lišty čelního panelu se zde nacházejí tlačítka Run, Run Continuously, Pause a Abort Execution, vlastnosti textu, hledání a kontextová nápověda. Prvním novým tlačítkem je zobrazení toku dat, kdy je celý program spuštěn postupně po vykonávaných krocích zpomalený, přičemž se při běhu programu zobrazuje tok dat, takže vidíme, jak program postupuje ve spouštění programu, krok po kroku. Dalším důležitým tlačítkem je tlačítko sondy, které umožňuje zobrazovat hodnoty/grafy na libovolných částech programu. Další tlačítka jsou Step into, Step over a Step out. Využívají se ke krokování programu, když chceme odladit program. Při stisku Step into se vykoná jeden uzel, který se současně zvýrazní. Step over spustí celý uzel jako jeden krok v další hlavní funkci. Step out také vykoná uzel jako jeden krok, ale ve volajícím VI nebo struktuře (pokud taková struktura není, je tlačítko neaktivní). [1]



Obrázek 3 - Nástrojová lišta blokového diagramu

2.1.3 SubVI

Další, velmi důležitou součástí programovacího prostředí LabVIEW jsou takzvané SubVI, což jsou zjednodušené bloky obsahující podprogramy. Tyto SubVI usnadňují práci s programem, jelikož přetvářejí složitější programy v mnohem přehlednější programy. Několik SubVI můžete také vidět v programu vytvořeném pro měření BH křivek. Pro příklad uvedu transformaci jednoduchého programu do SubVI. Jedná se o převod stupňů Celsia na stupně Fahrenheita. Z bloku násobení a sčítání lze udělat jeden jednoduchý blok s jedním vstupem a jedním výstupem.



Obrázek 4 – Příklad využití funkce SubVI

Jednotlivé SubVI jsou znázorněny bloky, jak lze vidět na obrázku 7 výše. Vzhled SubVI bloku můžeme poté v jednoduchém editoru upravit pro vyšší přehlednost.

2.1.4 DAQ device

Velmi důležitou součástí programovacího prostředí LabVIEW jsou takzvaná DAQ zařízení, což je zkratka pro Data Acquisition Device. Zjednodušeně je to proces měření elektrických a fyzikálních veličin, jako například napětí, proudu, teploty, tlaku, nebo zvuku pomocí počítače. DAQ systém sestává ze senzorů, měřícího hardware a počítače s programovatelným software. Stačí danou kartu zapojit do počítače a poté v LabVIEW přes paletu Express kliknout na DAQ Assist, což je asistent, který nás provede nastavením připojené karty. Zde si můžeme určit, jaké vstupy či výstupy budeme používat a co budeme měřit, převodní poměry mezi měřeními a skutečnými hodnotami, snímací frekvenci, počet snímaných vzorků atd.

Program LabVIEW je tedy, jak můžete vidět, velmi intuitivní a používá jednoduchý grafický programovací jazyk.

3 ČIDLA PROUDU

Čidla proudu jsou zařízení používaná k měření průběhu, velikostí a frekvencí elektrického proudu. Existuje několik způsobů měření elektrického proudu. Jedním způsobem je přidání paralelně zapojeného bočnicku, na kterém změříme úbytek napětí, který je úměrný procházejícímu proudu čidlem. Dalším způsobem je použití měřicího transformátoru, kde hodnotu proudu získáme přepočítáním hodnot ze sekundární strany na stranu primární. Dalšími způsoby je například použití Rogowskiho cívky či čidel využívajících Hallovy sondy.



Obrázek 5 - Příklad čidel proudu [2]

3.1 Využití čidel proudu

Proudová čidla mají nespočet využití, používají se například ve výtazích, obnovitelných zdrojích, kolejové dopravě, nemocničních zařízeních či například v automobilové dopravě. Zde upřesním těchto několik příkladů využití těchto čidel:

- **Ve výtazích** – Zabraňují zavření dveří, když jim cestující stojí v cestě, či nechtěně strčí ruku do prostoru dveří. Pomáhají udržovat kabinu výtahu stabilní při nástupu pasažérů a zajišťují pozvolný rozjezd výtahu regulováním točivého momentu motoru.
- **V obnovitelných zdrojích** – Ovládají tok a průběh energie poslané do sítě z fotovoltaických článků a dalších systémů obnovitelných zdrojů. Měří proud k zlepšení účinnosti větrných mlýnů a fotovoltaických článků.
- **V trakcích** – Trakce je zajišťována elektrickými motory řízenými invertory, které spoléhají na čidla, aby změřila, optimalizovala a upravila výkon poslaný do motoru, čímž zlepší jak výkon, tak spolehlivost.
- **V aplikacích citlivých na přesnost** – Kvalita obrazu vytvořeného magnetickou rezonancí je úzce spojena s přesností měření proudu. Pokud by čidlo nebylo dostatečně přesné, vedlo by to k rozmazanému, a tudíž nepoužitelnému obrazu.
- **V automobilové dopravě** – V elektrických a hybridních vozidlech čidla monitorují úroveň energie jdoucí do a z baterie a jsou stěžejní pro řízení elektrických motorů [2]

3.2 Kritéria výběru čidel proudu

Proudová čidla se za několik let svého vývoje rozrostla natolik, že můžeme najít mnoho odlišných aplikací, pro které se hodí různé typy čidel proudu. Proto při výběru snímačů musíme zvážit několik kritérií, které má čidlo pro žádanou aplikaci splňovat. Nejdůležitějšími kritérii jsou:

- **Elektrické požadavky** – zda se jedná o čidlo stejnosměrného či střídavého proudu, jejich provozní parametry atd.
- **Dynamické provozní požadavky** – zahrnují frekvenční rozsahy měření, maximální strmost proudu atd.
- **Environmentální kritéria** – Minimální a maximální pracovní teplota, vibrace a nárazy, přítomnost externích polí
- **Mechanické požadavky** – Upevnění, velikost aparatury, hmotnost či typy použitých materiálů [3]

3.3 Dělení čidel proudu

Čidla proudu můžeme rozdělit podle několika kritérií, například podle jejich měřicího rozsahu, podle typu procházejícího proudu, nebo principu měření. Zde uvedu několik příkladů dělení proudových čidel:

1. Podle typu procházejícího proudu:
 - Střídavý (AC)
 - Stejnosměrný (DC)
2. Podle principu měření:
 - S Hallovoú sondou
 - Fluxgate
 - Rogowskiho cívka
 - Měřicí transformátory
 - Pomocí bočníku

3.3.1 Čidla využívající Hallovy sondy

Čidla využívající Hallovu sondu se dělí na 3 typy. Jsou to čidla pracující na principu otevřené smyčky (open loop – OL), na principu uzavřené smyčky (closed loop – CL) a čidla pracující na základě elektrotechnologie (ETA). [4]

3.3.1.1 Hallova sonda

Hallova sonda je elektronická součástka, jejíž funkce je založena na využití Hallova jevu. Jedná se o polovodičovou destičku, skrze kterou protéká stejnosměrný proud. Pokud ji vložíme do magnetického pole, tak ní prochází indukční tok a přesouvá náboje v destičce na jednu stranu. Tím na Hallově sondě vzniká napětí. Toto napětí lze vypočítat pomocí vzorce 3.1:

$$U_h = k \cdot I \cdot B \quad 3.1$$

Kde k je konstanta definující materiál a tloušťku destičky

I je stejnosměrný proud destičkou

B je magnetická indukce způsobená magnetickým polem

Nepůsobí-li magnetické pole, je magnetická indukce B rovno nule, a tudíž i Hallovo napětí je rovno nule. [5]

3.3.1.2 Otevřená smyčka

Čidla proudu založená na principu otevřené smyčky jsou zároveň i elektronické transformátory. [4]

Umožňují měřit stejnosměrné, střídavé i pulsní proudy, se zároveň galvanicky izolovaným primárním a sekundárním obvodem. Jsou tvořené kruhovým feromagnetickým jádrem se vzduchovou mezerou, Hallovou sondou a zesilovačem. [4]

Primární proud I_p , který teče kabelem procházejícím vevnitř feromagnetického jádra, indukuje magnetický tok. Tento tok vyvolá magnetický tok ve feromagnetickém jádře. Sonda umístěná ve vzduchové mezeře reaguje na tento magnetický tok a generuje Hallovo napětí úměrné procházejícímu proudu kabelem I_p . Elektronický zesilovač poté toto Hallovo napětí zesílí, aby jej bylo možné lépe změřit. Takový senzor měří okamžité hodnoty proudů. [4]

Výhody:

- Galvanické oddělení primárního a sekundárního obvodu
- Možnost měřit jakýkoliv typ signálu (stejnosměrný, střídavý, pulsní, ...)
- Dobrá přesnost při středních frekvencích (jednotky až desítky kHz)
- Vysoká spolehlivost
- Nízká spotřeba
- Nižší hmotnost a velikost
- Excelentní poměr cena/výkon [4]

Využití:

- Průmysl – jeřáby, sváření telekomunikace, aktivní harmonické filtry, nabíječky baterií... [4]

3.3.1.3 Uzavřená smyčka

Čidla proudu založená na principu uzavřené smyčky jsou také elektronické transformátory. Jejich funkce je velmi podobná otevřené smyčce. Uzavřená smyčka obsahuje navíc další drát, namotaný na feromagnetickém jádře. Tímto drátem protéká vyrovnávací proud I_s . [4]

Uzavřené smyčky umožňují měřit stejnosměrné, střídavé i pulsní proudy. Mají galvanicky oddělený primární a sekundární okruh. Primární proud I_p protéká vodičem provlečeným feromagnetickým jádrem a vytváří kolem sebe magnetické pole. Toto pole poté indukuje magnetický tok ve feromagnetickém jádře a ten je nadále zaznamenáván Hallovo sondou, která generuje Hallovo napětí. Toto napětí je poté zesíleno zesilovačem a převedeno na sekundární proud I_s . Tento proud vynásobený počtem závitů sekundárního vinutí N_s kompenzuje primární magnetický tok vytvořený vodičem. [4]

Vzorec 3.2 platí vždy.

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \quad 3.2$$

Tudíž sekundární proud I_s je přímo úměrný primárnímu proudu I_p . Čidla proudu s metodou uzavřené smyčky měří okamžité hodnoty proudu. [4]

Výhody:

- Galvanické oddělení primárního a sekundárního obvodu
- Možnost měřit jakýkoliv typ signálu (stejnosměrný, střídavý, pulsní, ...)
- Vysoká přesnost při velkém rozsahu frekvencí (jednotky až stovky kHz)
- Vysoký dynamický výkon
- Možnost pracovat s vysokými proudy (díky nulovému magnetickému toku téměř nulové ztráty)
- Vysoká spolehlivost [4]

Využití:

- Průmysl (záložní zdroje, aktivní harmonické filtry, nabíječky baterií, větrné generátory, robotika, jeřáby, vojenství)
- Trakce (konvertory, nabíječky baterií, vrtulníky, hornictví) [4]

3.3.2 Elektronická technologie

Čidla proudu využívající tento princip měření jsou celá tvořena elektronikou. Na rozdíl od uzavřených a otevřených smyček čidlo neobsahuje žádný magnetický obvod.

Umožňují měřit stejnosměrné, střídavé a impulsní proudy. Mají galvanicky oddělené primární a sekundární obvody. Primární proud I_p teče přes senzor a indukuje magnetické pole. Několik Hallových sond obsažených v senzoru měří velikost magnetického toku vytvořeného vodičem. Elektronické obvody zpracují signály (sečtou a zesílí) a vytvoří dva výstupní proudy I_{s1} a I_{s2} a/nebo dvě výstupní napětí U_{s1} a U_{s2} . Všechny výstupy jsou přímo úměrné měřenému primárnímu proudu. Čidla měřící tímto způsobem měří okamžitou hodnotu proudu. [4]

Výhody

- Galvanické oddělení primárních a sekundárních obvodů
- Možnost měřit jakýkoliv typ signálu (stejnoseměrný, střídavý, pulsní, ...)
- Velmi velký rozsah měření proudu (až 40kA) bez přehřátí čidla
- Vysoký dynamický výkon
- Nízká spotřeba energie
- Malá hmotnost a objem [4]

Využití

- Průmysl (záložní zdroje, větrné generátory, sváření, elektrolyza, usměrňovače, ...)
- Trakce (stanice metra pod nepřetržitým napětím) [4]

3.3.3 Technologie Fluxgate

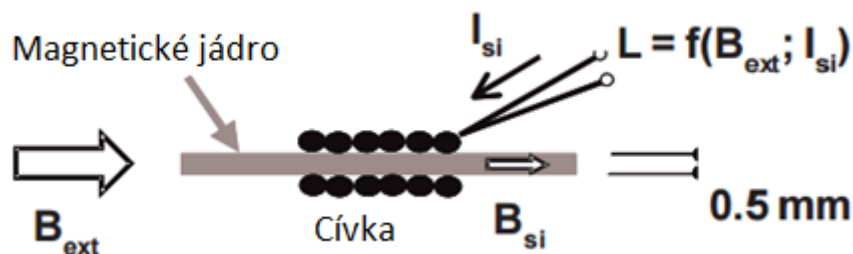
Fluxgate technologie je složena z několika typů izolovaných čidel proudu a napětí, která jsou založena na stejném základním principu: magnetické pole vytvořené vodičem procházejícím skrze feromagnetické jádro detekované specifickým měřicím prvkem. [3]

Dělení čidel Fluxgate

- Standartní typ
- C – typ
- IT – typ
- Nízkofrekvenční typ

Pracovní princip

Čidlo Fluxgate má velmi podobnou konstrukci jako čidla s uzavřenou smyčkou. Čidlo je stavěno velmi podobně a pracuje na stejném principu. Hlavním rozdílem mezi tímto čidlem a čidlem s uzavřenou smyčkou je způsob detekce magnetického pole ve vzduchové mezeře. Toto pole je detekováno nejen Hallovou sondou, ale také tzv. nasýtitelným induktorem. Tento nasýtitelný induktor je vyroben z malého, tenkého magnetického jádra, na kterém je navinuta cívka. [3]



Obrázek 6 - Hlava čidla Fluxgate detekující magnetické pole [3]

Proud I_{si} prochází cívkou, která je navinuta na nasýtitelném induktoru a vytváří ve feromagnetickém jádru magnetický tok způsobený indukčností B_{si} . Čidlo je navrženo tak, že směr magnetického toku vyvolaný magnetickou indukcí B_{ext} je stejný jako směr magnetické

indukce B_{si} . Obě tyto indukce ovlivňují velikosti indukčnosti. Indukčnost je tedy funkcí magnetické indukce B_{ext} a proudu I_{si} . [3]

Každá změna magnetického sycení hlavy čidla Fluxgate vede ke změně indukčnosti, kterou detekuje řídicí elektronika. V tomto případě je použita uzavřená smyčka, která změny v indukčnosti zaznamená a vykompenzuje použitím principu uzavřené smyčky, vedením proudu sekundární cívkou čidla, aby vyrovnala celkový magnetický tok na 0 a indukčnost zpět na referenční hodnotu. [3]

3.3.4 Čidlo proudu ITN 12-P Ultrastab

Nyní se blíže zaměřím na čidlo ITN 12-P od firmy LEM, jelikož pomocí něj jsem prováděl měření. Pomocí toho čidla je možné měřit stejnosměrné, střídavé i pulsní proudy při galvanické izolaci mezi primárním vysokovýkonným obvodem a sekundárním elektronickým obvodem. [6]

Čidlo má mnoho výhod:

- Vysoká přesnost
- Perfektní linearita
- Extrémně nízký teplotní drift
- Široké frekvenční pásmo
- Vysoká odolnost vůči externím elektrostatickým a magnetickým polím
- Vysoké rozlišení
- Malý šum na výstupním signálu [6]

Elektrické parametry:

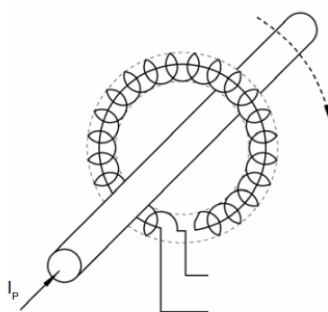
Elektrické parametry			
Jmenovitá hodnota stejnosměrného proudu	I_{PN}	12,5	A
Efektivní jmenovitá hodnota primárního proudu	I_{PN}	8,8	A
Rozsah měření primárního proudu	I_{PM}	$0 \dots \pm 12,5$	A
Maximální hodnota přetížení (100ms)	\hat{I}_P	$\pm 62,5$	A
Sekundární proud	I_S	$0 \dots \pm 50$	mA
Efektivní jmenovitá hodnota sekundárního proudu	I_{SN}	35	mA
Převodní poměr	K_N	1:250	
Velikost napájecího napětí	U_C	± 15	V
Velikost odebíraného proudu	I_C	$\leq 60 + I_S$	mA

Tabulka 1 - Elektrické parametry [6]

3.3.5 Rogowskiho cívka

Pojmenována po Německém fyziku Walteru Rogowskim, Rogowskiho Cívka je elektrické zařízení používané pro měření střídavého či pulsního proudu.

V nejjednodušší formě je Rogowskiho cívka rovnoměrně navinutá cívka s N počtem otáček na nemagnetickém jádře (nejčastěji plast) s konstantní plochou průřezu S . Navinutý drát končí tam, kde vinutí začalo, a to tak, že na konci vinutí je drát ohnut a veden zpět přes toroid po jeho centrální ose a společně s druhým koncem jsou obvykle zapojeny do jednoho vývodního kabelu. Toto nám dává možnost pohodlně obepnout vodič, aniž by bylo potřeba jej někde přerušit. [7]



Obrázek 7 - Rogowskiho cívka [3]

Výhody

Oproti ostatním metodám měření má Rogowskiho cívka několik výhod, a to:

- Cívka je lehká, flexibilní a není potřeba rozpojovat měřicí kabel pro zapojení cívky
- Velikost cívky není závislá na amplitudě měřeného proudu
- Širokopásmový rozsah měření frekvence. Ideální pro měření kvality elektrické energie
- Velmi bezpečné, nehrozí nebezpečí otevřeného sekundární obvodu
- Galvanicky izolované
- Excelentní linearita – cívka nemá žádné magnetické obvody schopné saturace
- Schopné vydržet vysoké nadproudy bez poškození
- Možnost měřit malé střídavé proudy v přítomnosti velkých stejnosměrných proudů [7]

3.3.6 Měřicí transformátory proudu

Úkolem transformátoru je transformovat vysoké proudy a napětí na nižší hodnoty.



Obrázek 8 - Měřicí transformátory proudu a napětí [8]

Napěťové transformátory obsahují jen jedno magnetické jádro a většinou mají jen jedno sekundární vinutí. Oproti transformátorům proudu nikdy nesmí být zkratovány na sekundární straně. Zemní terminál primárního vinutí je účinně uzemněn uvnitř aparatury a nikdy nesmí být odstraněn. [8]

Parametry transformátorů

- **Jmenovitý proud I_N [A]** – Nejčastější hodnoty jsou (10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75) A
- **Krátkodobý oteplovací proud I_{th}** – proud, který transformátor vydrží 1-3 sekundy bez nenávratného poškození.
- **Dynamický proud I_{dyn}** – proud, který transformátor vydrží bez mechanického či elektrického poškození účinkem elektromagnetických sil, při sekundárním vinutí při zkratu.
- **Převodní poměr transformátoru** – Poměr mezi primárním proudem a sekundárním proudem, je zapsáno ve tvaru zlomku, např. 500 A/1 A.
- **Výstup S_N** – hodnota komplexního výkonu, pro kterou si transformátor musí zachovat přesnost měření – Nejčastější hodnoty jsou (2,5; 5; 10; 15; 30) VA
- **Chyba měření F_i**
- **Posun fází d_i** – rozdíl mezi vektory primární a sekundární fáze, pro ideální transformátor rovno nule. Posun je kladný, když sekundární vektor předhání primární vektor. Vyjadřuje se v minutách [8]

3.3.7 Použití bočnicku

Bočník jako proudové čidlo je sériově zapojený rezistor s nízkou hodnotou odporu, který se využívá pro měření střídavých a stejnosměrných proudů pomocí úbytku napětí, který měřený proud vytváří při průchodu skrz tento bočník.

Pro příklad. Proudový bočník, jehož odpor je $1\text{ m}\Omega$ a procházejícím proudem 50 A vytvoří úbytek napětí $0,001 \cdot 50 = 0,05\text{ V}$. Vzhledem k tomu, že známe odpor bočnicku a známe úbytek napětí, můžeme pomocí upraveného vzorečku výše vyjádřit $I = U/R$. Stejně tak, pokud známe proud a úbytek napětí na bočnicku, můžeme jednoduše zjistit jeho odpor. [9]

Charakteristiky a specifikace

Ideálně vyrobený bočník má přesnou hodnotu odporu, který výrobce tvrdí. Tento odpor se nemění s teplotou, věkem ani procházejícím proudem. Jeho indukčnost je nula. Precizně kalibrované bočníky se blíží těmto ideálům, bohužel jsou ale velké a drahé. [9]

Reálně využívané bočníky jsou charakterizovány těmito údaji:

Jmenovitý proud - např. 100 A

Výstupní napětí – ukazuje, jaké napětí naměříme při daném proudě (např. při 100 A naměříme 50 mV , z čehož vychází, jakou má bočník rezistenci.

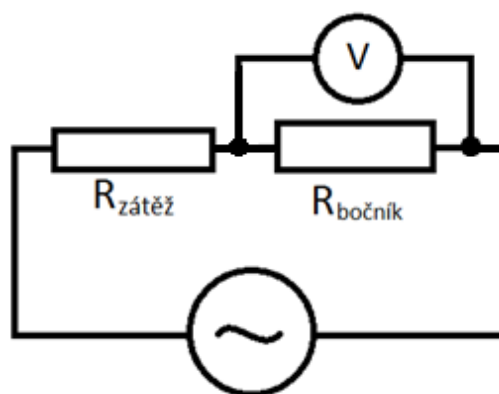
Přesnost hodnoty rezistence – např. $1\text{ m}\Omega \pm 0,25\%$ dané hodnoty

Teplotní drift – udává změnu rezistence při změně teploty o $1\text{ }^\circ\text{C}$

Jmenovitý výkon – V praxi mají bočníky jmenovitý proud jen na 66% skutečné hodnoty, kterou by ještě vydržely. Takže pokud potřebujete dlouhodobé měření 80 A , nemůžete použít 100 A bočník, jelikož je stavěný jen na 66 A . U mnoha bočníků nalezneme i graf závislosti změny odporu na teplotě. [9]



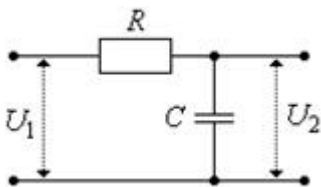
Obrázek 9 - Příklad proudového bočnicku [9]



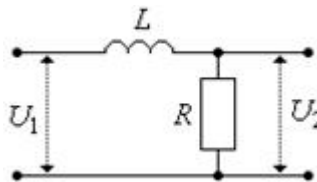
Obrázek 10 - Schéma zapojení proudového bočnicku

4 INTEGRAČNÍ ČLÁNEK

Integrační článek je elektrotechnická součástka, která v obvodu zastává matematickou funkci integrál. Výstupní napětí poté odpovídá integrálu vstupního napětí v závislosti na čase. [10]



Obrázek 11 – Integrační RC článek [10]



Obrázek 12 – Integrační LR článek [10]

Existují dvě zapojení integračního článku, RC článek a LR článek.

Pro odvození funkcí těchto článků budeme uvažovat ideální zdroj napětí U_1 (vstupní napětí) a výstup článku naprázdno, tedy bez připojené zátěže. Výstup článku je odpojen, tudíž mezi svorkami, na kterých měříme výstupní napětí, tak je teoreticky nekonečně velký odpor. Kvalitu přenosu signálu integračním článkem vyjádříme pomocí napětěvého přenosu integračního článku neboli poměr výstupního napětí ku vstupnímu. [10]

Pro popsání nejprve použijí RC článek, jehož schéma je na obrázku 24. Vstupní napětí U_1 , které měříme na sériové kombinaci rezistoru o odporu R a kondenzátoru o kapacitě C , dostaneme jako

$$\hat{U}_1 = (R + X_C) \cdot \hat{I} = \left(R + \frac{1}{\omega C \cdot j}\right) \cdot \hat{I} \quad 3.7$$

Kde X_C je reaktance kondenzátoru [Ω]

\hat{I} je fázor procházejícího elektrického proudu [A]

ω je úhlová frekvence procházejícího proudu [A]

j je imaginární jednotka [-] [10]

Pro výstupní napětí U_2 , kde máme jednoduchý kondenzátor o kapacitě C , dostáváme

$$\hat{U}_2 = X_C \cdot \hat{I} = \frac{1}{\omega C \cdot j} \cdot \hat{I} \quad 3.8$$

Velikost elektrického proudu procházejícího článkem je stejná jak na vstupu, tak na výstupu. Změnou vstupní a výstupní impedance článku se mění pouze napětí.

Pro napětěvý přenos článku tedy můžeme psát

$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{\omega C \cdot j} \cdot \hat{I}}{\left(R + \frac{1}{\omega C \cdot j}\right) \cdot \hat{I}} = \frac{\frac{1}{\omega \cdot RC \cdot j} \cdot \hat{I}}{\frac{\omega \cdot RC \cdot j + 1}{\omega C \cdot j} \cdot \hat{I}} = \frac{1}{1 + \omega \cdot RC \cdot j} \quad 3.9$$

Pro LR článek na obrázku 25 budeme postupovat obdobně. Vstupní napětí U_1 , které měříme na sériové kombinaci rezistoru o odporu R a cívky s indukčností L a je tedy

$$\hat{U}_1 = (R + X_L) \cdot \hat{I} = (R + \omega L \cdot j) \cdot \hat{I} \quad 3.10$$

A výstupní napětí U_2

$$\hat{U}_2 = R \cdot \hat{I} = R \cdot \hat{I} \quad 3.11$$

Proto pro napěťový přenos LR článku dostáváme

$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R \cdot \hat{I}}{(R + \omega L \cdot j) \cdot \hat{I}} = \frac{R \cdot \hat{I}}{R \cdot \hat{I} \cdot (1 + \omega \cdot \frac{L}{R} \cdot j)} = \frac{1}{1 + \omega \cdot \frac{L}{R} \cdot j} \quad 3.12$$

Z výše uvedených vztahů lze vidět, že čitatele obou vztahů jsou bez jednotky, tudíž i jmenovatele musí být bez jednotky. Lze tedy vidět, že pokud j je bez jednotky a úhlová frekvence ω má jednotku s^{-1} , musí mít výraz $R \cdot C$ a zlomek $\frac{L}{R}$ jednotku s a proto $R \cdot C = \frac{L}{R} = 1$.

Můžeme tedy definovat časovou konstantu τ , pro kterou platí $\tau = R \cdot C = \frac{L}{R}$

Oba přenosy tedy mají stejný tvar a to

$$A = \frac{1}{1 + \omega \cdot \tau \cdot j} \quad 3.13$$

Kde $\omega = 2\pi f$,

Tudíž vztah bude mít tvar

$$A = \frac{1}{1 + 2\pi f \cdot \tau \cdot j} \quad 3.14$$

Můžeme definovat mezní frekvenci f_m vztahem

$$f_m = \frac{1}{2\pi f \cdot \tau} \quad 3.15$$

A s tímto můžeme přepsat přenos článku jako

$$A = \frac{1}{1 + \frac{f}{f_m} \cdot j} \quad 3.16$$

Pokud se podíváme na přenosy obou článků, můžeme vidět, že napěťové přenosy obou článků jsou stejné, tudíž oba ovlivňují procházející signál stejným způsobem. Přenosová charakteristika obou článků je také stejná. [10]

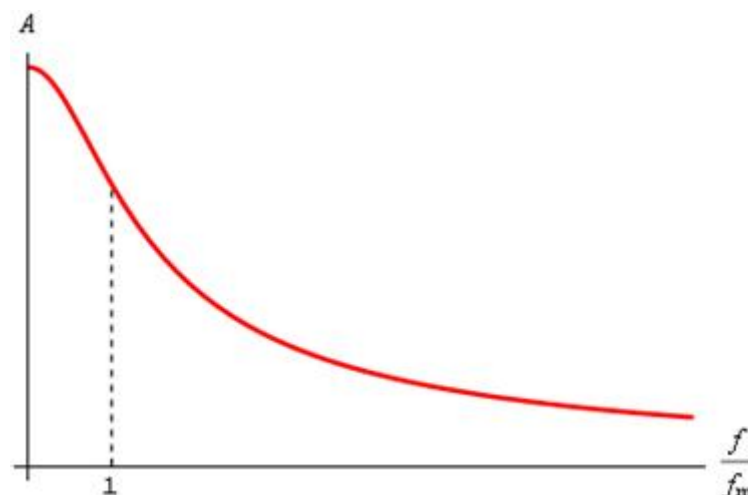
Pro zjištění jejich útlumové charakteristiky je třeba vyjádřit absolutní hodnotu napěťového přenosu článku. Pro absolutní hodnotu napěťového přenosu článku dostaneme

$$|A| = \frac{|1|}{|1 + \frac{f}{f_m} \cdot j|} \quad 3.17$$

Z definice absolutní hodnoty komplexního čísla dostáváme

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}} \quad 3.18$$

Graf této útlumové charakteristiky je zobrazen na obrázku 26.



Obrázek 13 – Útlumová charakteristika integračního článku [10]

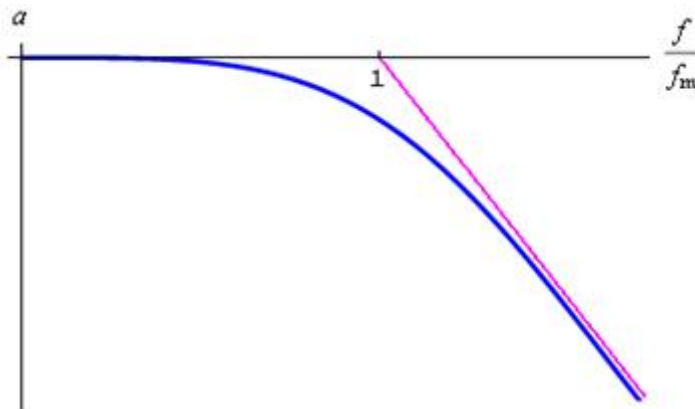
Pro zobrazení logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky můžeme psát

$$a = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}} \quad 3.19$$

Při využití logaritmických funkcí a jejich vlastností můžeme tento tvar dále upravit na

$$a = 20 \log 1 - 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2} = -10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2 \right] \quad 3.20$$

Přičemž $[a] = \text{dB}$ (decibel). Graf této funkce je zobrazen na obrázku 27.



Obrázek 14 – Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika RC/RL článku [10]

Na vodorovné ose jsou hodnoty vynášeny v logaritmickém měřítku. V grafu je také zobrazena tečná ke grafu pro vysoké frekvence, jejíž směrnice má hodnotu 20 decibelů na dekádu. Pro velké hodnoty podílu f/f_m můžeme charakteristiku psát jako

$$a = -10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2 \right] = -10 \log \left(\frac{f}{f_m}\right)^2 = -20 \log \left(\frac{f}{f_m}\right) \quad 3.21$$

Protože 1 je vzhledem ke druhé mocnině podílu frekvencí zanedbatelná. Proto lze vidět, že pro vysoké hodnoty vstupních frekvencí je směrnice tečny skutečně 20 dB na dekádu. [10]

Z výše zobrazených charakteristik a výrazů lze vidět, že integrační články mají charakter dolní propusti. To znamená, že propustí pouze signály frekvencí nižších než daná mezní frekvence článku. Tato frekvence závisí na zvolených parametrech R, L a C daného integračního článku. Nyní uvedu vysvětlení, proč článek pracuje jako dolní propust. [10]

Při nízkých frekvencích má kondenzátor v RC článku velkou kapacitanci, tudíž je na něm soustředěno velké napětí. Jelikož je kondenzátor zapojen na výstupu, napětí na něm se při snižující frekvenci zvyšuje. Článek tedy signál propouští. Se zvyšující se frekvencí se kapacitance snižuje, a tudíž se snižuje i výstupní napětí článku. Napětí vyšších frekvencí článkem tedy neprochází, tudíž pracuje jako dolní propust. [10]

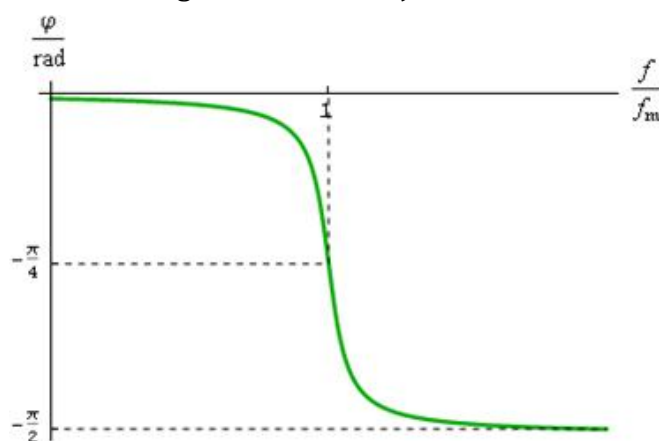
LR článek pracuje podobně. Pro nízké kmitočty je indukance cívky velmi malá a článkem tedy prochází elektrický proud, tudíž je na výstupním odporu relativně velké napětí. Při zvyšující se vstupní frekvenci roste indukance cívky, která brání průchodu proudu, což způsobuje pokles výstupního napětí článku. V tomto případě tedy článek zeslabuje vstupující napětí a signál článek neprochází. LR článek tedy také propouští signály nižších frekvencí. Hodnota rezistence není závislá na frekvenci, tudíž se při změně frekvence nemění. [10]

Jako poslední zmíním fázovou charakteristiku integračního článku. Pro zobrazení této charakteristiky je třeba najít závislost fáze φ procházejícího signálu na frekvenci. Fázi určím vyjádřením argumentu komplexního čísla, který popisuje napěťový přenos integračního článku. [10]

Obecné vyjádření argumentu komplexního čísla je vztah $\varphi = \arctg \frac{\text{Im}(A)}{\text{Re}(A)}$, kde $\text{Im}(A)$ znázorňuje imaginární část komplexního čísla a $\text{Re}(A)$ jeho reálnou část. V případě integračního článku platí

$$\varphi = -\arctg \frac{f}{f_m} \quad 3.22$$

Fázová charakteristika integračního článku je zobrazena na obrázku 28. [10]

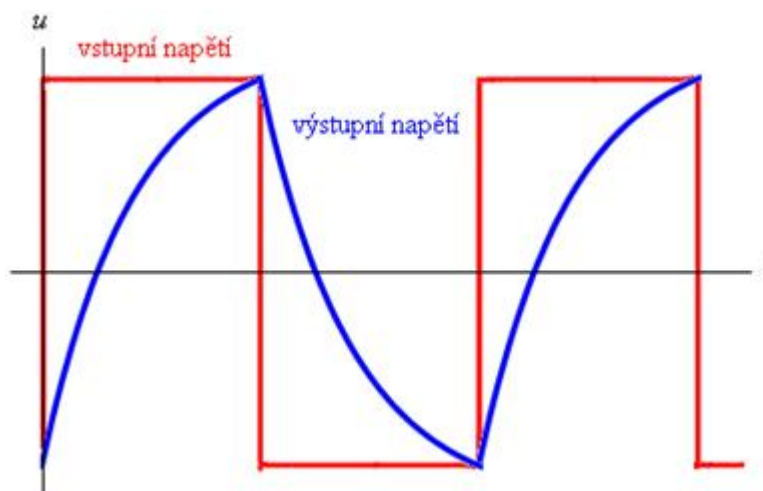


Obrázek 15 – Fázová charakteristika integračního článku [10]

Na obrázku 29 můžeme vidět časový průběh vstupního a výstupního napětí integračního článku. Parametry výstupního napětí, jako je například křivost křivky, se mohou měnit, ale vždy se bude jednat o exponenciální pokles závislý na úhlové frekvenci charakteristické pro tento článek. [10]

Při průběhu obdélníkového impulsu, konkrétně čela impulsu, se kondenzátor začíná nabíjet a napětí na něm roste exponenciálně a do okamžiku nabití kondenzátoru. Tento průběh nabíjení kondenzátoru tvoří náběžnou hranu impulsu výstupního napětí. Při změně polaroty vstupního napětí se nabitý kondenzátor začne vybíjet přes rezistor a vnitřní impedance vstupních bloků. Vybíjení kondenzátoru má také exponenciální průběh. [10]

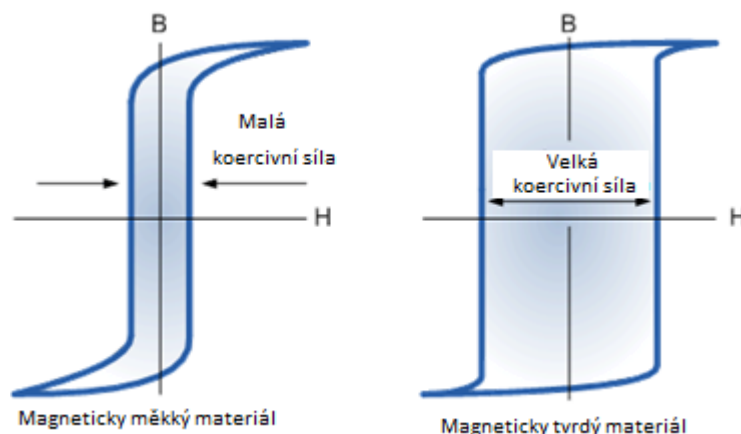
Při zvyšování kapacity kondenzátoru se náběžné a sestupné hrany obdélníkového impulsu začínají zaoblovat. Původní obdélníkový průběh se začíná více podobat pilovitému a následně trojúhelníkovému průběhu. Při dalším zvyšování kapacity kondenzátoru se kondenzátor nestíhá nabíjet a vybíjet, čímž se snižuje rozdíl mezi maximy a minimy tohoto průběhu. [10]



Obrázek 16 – Fázová charakteristika integračního článku [10]

5 MAGNETICKÁ HYSTEREZE

Zpoždění či prodleva magnetického materiálu obecně známá jako magnetická hystereze se týká magnetizačních vlastností materiálu, který se nejprve magnetizuje a poté demagnetizuje. [11]



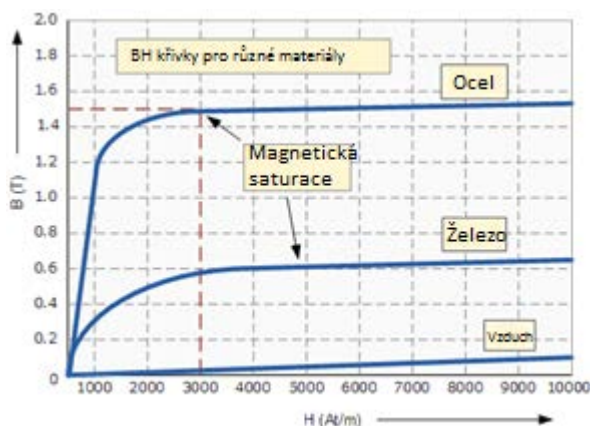
Obrázek 17 – Příklad BH křivky magneticky měkkého a tvrdého materiálu [11]

Víme, že magnetický tok generovaný elektromagnetickou cívkou je velikost magnetického pole nebo siločar vytvořený uvnitř dané oblasti je známy spíše pod pojmem magnetická indukce. [11]

Značí se B a má jednotku Tesla [T]. Také víme, že intenzita magnetického pole závisí na počtu závitů cívky, proudu procházejícím skrz cívku nebo na typu materiálu jádra. Pokud zvýšíme proud, počet závitů či použijeme magneticky tvrdší materiál, můžeme zvýšit intenzitu magnetického pole značící se H . [11]

Relativní permeabilita μ_r je podíl absolutní permeability μ a permeability vakua μ_0 . Vztah mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H je $B = \mu \cdot H$. [11]

Zobrazením závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H vznikne magnetizační křivka, křivka magnetické hystereze neboli více užívaný výraz B-H křivka pro každý použitý materiál zobrazený níže. [11]



Obrázek 18 – Příklad B-H křivek pro ocel, železo a vzduch [11]

Na obrázku 31 můžete vidět, že magnetická indukce vzrůstá poměrově k intenzitě magnetického pole, dokud nedosáhne určité hodnoty, kdy se již nemůže dále zvyšovat a stává se téměř hladkou a konstantní. Jádru si lze představit složené z obrovského množství malých magnetických atomů, kolem kterých podle Weberovi teorie cirkulují v rozdílných, neprotínajících se drahách dva druhy fluida. Při dosažení limitu magnetické indukce jsou všechny tyto atomy zarovnány ve směru siločar a není již možné dále zvyšovat její velikost. Při dalším navyšování intenzity magnetického pole bude magnetická indukce konstantní. [11]

Moment, kdy magnetická indukce dosáhne svého limitu, se nazývá magnetická saturace. V případě uvedeném na obrázku 31 tento bod začíná při 3000 ampér-závitech na metr. [11]

5.1 Remanence

Předpokládejme, že mám elektromagnetickou cívku s vysokou intenzitou magnetického pole důsledkem proudu tekoucím skrze ni a že feromagnetické jádro dosáhnu bodu saturace, nejvyšší magnetické indukce. Pokud bychom nyní rozepli obvod a tím přerušili magnetizující proud tekoucí skrze cívku, očekávali bychom, že magnetické pole okolo cívky zmizí a velikost magnetické indukce bude nula. [11]

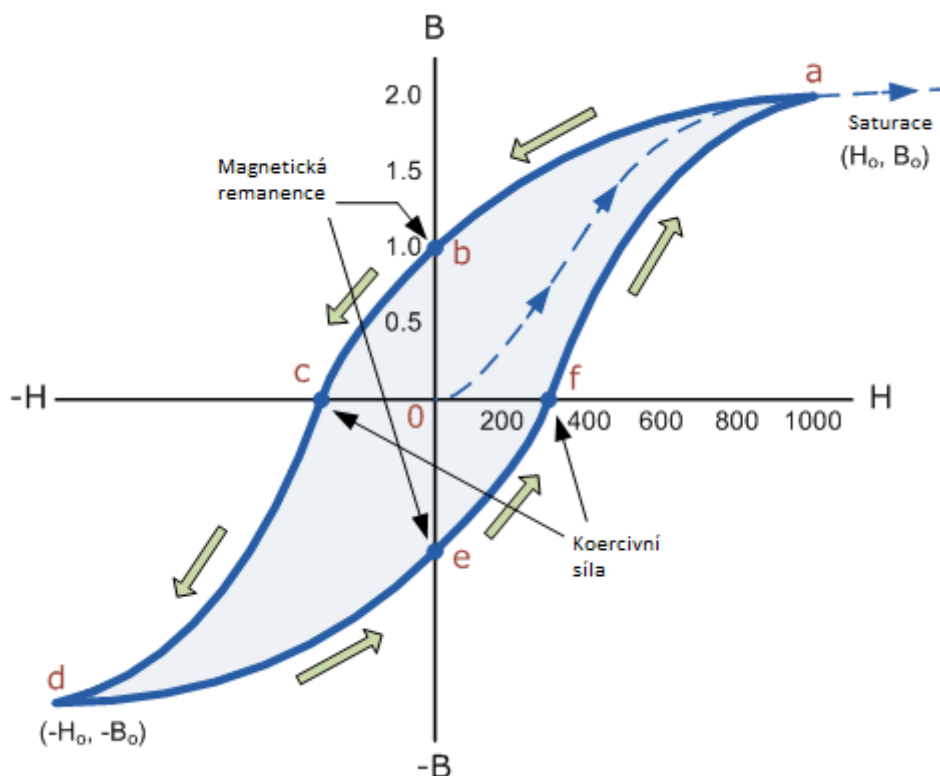
Nicméně magnetická indukce nezmizí úplně, jelikož si feromagnetické jádro stále zachovává část svého magnetismu, i přesto, že proud cívkou přestal téct. Tato schopnost se nazývá remanence a množství zbylé magnetické indukce se nazývá remanentní indukce a značí se B_r . [11]

Důvodem je to, že některé z molekulárních magnetů se nevrátí do původního náhodného vzoru a stále ukazují ve směru siločar vytvořených původní magnetizací. Některá feromagnetika mají vysokou remanenci (magneticky tvrdé), což je činí výbornými pro výrobu magnetů. Naopak jiná feromagnetika mají nízkou remanenci, a proto jsou ideální pro výrobu elektromagnetů, solenoidů nebo relé. [11]

Jedním způsobem, jak snížit remanentní indukci na nulu je obrátit směr proudu tekoucí skrze cívku, což způsobí zápornou hodnotu intenzity magnetického pole. Tento efekt se nazývá koercivní síla a značí se H_c . [11]

Pokud je velikost obráceného směru proudu dále navyšována, magnetická indukce se také bude navyšovat v záporném směru, dokud feromagnetické jádro znovu nedosáhne saturace, tentokrát ale v opačném směru. Přerušením proudu tekoucím cívku znovu dochází k remanenci v tomto směru magnetizace. [11]

Konstantní změnou směru proudu tekoucím cívku z kladného do záporného směru, jak je to u střídavého napájení, vytvoříme hysterezní křivku feromagnetického jádra. [11]



Obrázek 19 – Hysterezní křivka [11]

Na obrázku 32 výše můžeme vidět, že závislost mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H je nelineární. Na začátku, při nezmagnetizovaném jádře, jak B tak H budou nula. Pokud je magnetizační proud tekoucí cívkou navýšen v kladném směru na určitou hodnotu, intenzita magnetického pole se bude navyšovat lineárně v závislosti na proudu a magnetická indukce také bude růst až do bodu saturace, jak je zobrazeno na obrázku 32 přerušovanou čarou. [11]

Nyní, pokud bude proud tekoucí cívkou přerušen, magnetické pole kolem cívky se také sníží na nulu. Nicméně, magnetická indukce neklesne na nulu vzhledem k magnetické remanenci jádra. Tento krok je zobrazen na obrázku 32 jako křivka z bodu a do bodu b . [11]

Pro snížení magnetické indukce z hodnoty v bodě b na nulu musíme obrátit směr proudu tekoucí cívkou. Magnetizační síla, potřebná k vynulování magnetické indukce z hodnoty remanentní indukce se nazývá koercitivní síla. Tato síla obrací magnetické pole, čímž otáčí molekulární magnety, dokud jádro není demagnetizováno, na obrázku 32 je to bod c . [11]

Další navýšení proudu cívkou v záporném směru způsobí magnetizaci jádra v opačném směru, až do bodu saturace, tentokrát ale v opačném směru, bod d na obrázku 32. Tento bod je symetrický k bodu b . Pokud je magnetizační proud znovu přerušen, dochází ke snížení magnetické indukce a znovu se zde projeví magnetická remanence, tentokrát ale v opačném směru, na obrázku 32 je vyobrazen v bodě e , který je symetrický k bodu b podle osy H . [11]

Pokud znovu obrátíme směr proudu cívkou do kladného směru, dochází k poklesu magnetické indukce na nulu do bodu f a další navýšení proudu způsobí nasycení jádra do bodu a . [11]

B-H křivka postupně vykresluje cestu a-b-c-d-e-f, jak se postupně mění směr magnetizačního proudu, jako například při cyklu střídavého napětí. [11]

Vliv magnetické hystereze ukazuje, že magnetizační proces feromagnetického jádra, a tudíž magnetická indukce závisí na tom, ve které části hysterezní křivky se feromagnetické jádro magnetizuje, což závisí na historii obvodu, což dává jádru jakýsi druh "paměti". Feromagnetické materiály mají paměť, protože zůstávají zmagnetizovány i po tom, co je magnetické pole odstraněno. [11]

Nicméně, magneticky měkké materiály jako železo nebo křemíková ocel, mají velmi úzké magnetizační křivky, což vyúsťuje ve velmi malé hodnoty magnetické remanence. Tyto materiály jsou ideální pro použití na relé, solenoidy a transformátory, jelikož mohou být lehce zmagnetizovány a demagnetizovány. [11]

Jelikož musí být použita koercivní síla pro překonání zbytkového magnetismu, musí být provedena práce při uzavírání hysterezní křivky energií, která je rozptýlována jako teplo v magnetickém materiálu. Toto teplo je známé jako hysterezní ztráty a jeho velikost závisí na velikosti potřebné koercivní síle. [11]

5.2 Měření B-H křivky

Základní měřicí schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 33 níže. Modifikace spočívá ve dvou úpravách:

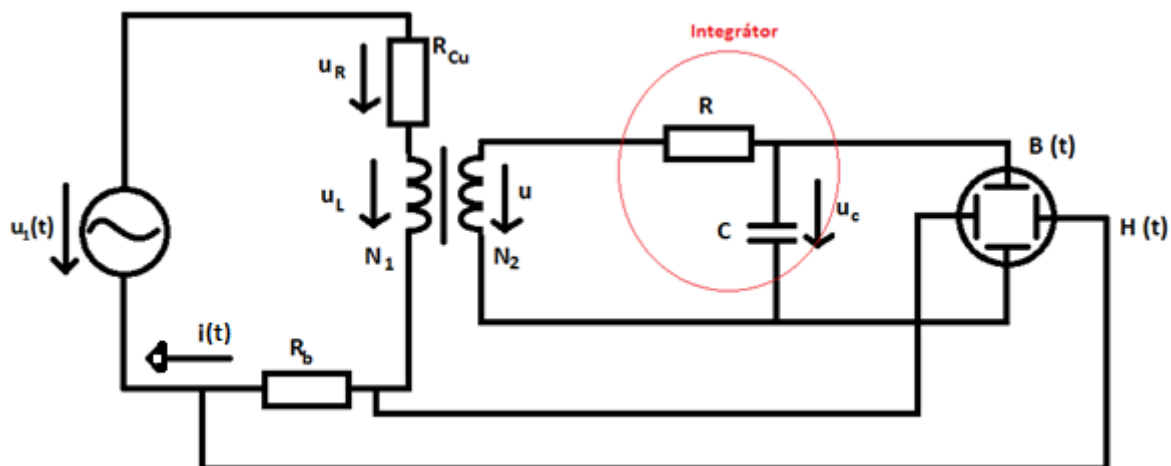
- Napětí je snímáno ze sekundárního vinutí N_2 , která má těsnou vazbu s primárním pracovním vinutím N_1 . Těsnou vazbou těchto vinutí je vyloučen parazitní napěťový úbytek u_R , vznikající na odporu R_{Cu} primárního vinutí.
- Přesný aktivní integrátor, který bývá nejlépe realizovaný operačním zesilovačem, je nahrazen pasivním integračním článkem typu RC nebo LR [12]

Měření B-H křivek probíhá většinou při kmitočtu napájecího napětí $f_m = 50 \text{ Hz}$. Přesný aktivní integrátor můžeme poté nahradit přibližným pasivním integrátorem, v našem případě RC-článkem. Pro co nejmenší chybu pasivního integrátoru musí být horní mezní kmitočet f_h integračního článku mnohonásobně nižší než napájecí kmitočet [12]

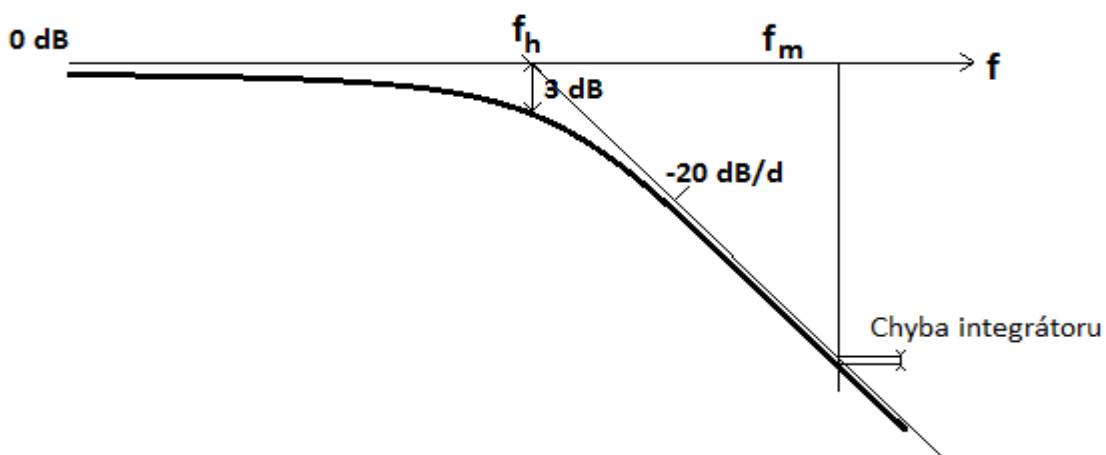
$$f_h = \frac{1}{2\pi RC} \ll f_m \quad 4.1$$

Při dodržení této nerovnosti dochází ke vzniku další nerovnosti, a to mezi napětími $u(t)$ a $u_c(t)$ na vstupu a výstupu integračního článku [12]

$$u_c(t) \ll u(t) \quad 4.2$$



Obrázek 20 – Schéma zapojení pro měření B-H křivky [12]



Obrázek 21 – frekvenční amplitudová charakteristika [12]

Napětí na výstupu RC-článku můžeme při dané nerovnosti vyjádřit přibližným vztahem

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{u(t) - u_c(t)}{R} dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{u(t)}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u(t) dt \quad 4.3$$

a při dodržení této rovnice můžeme sprážený tok vyjádřit jako

$$\Psi(t) = N_1 \Phi(t) = N_1 B(t) S_{Fe} = \int u_L(t) dt = \frac{N_1}{N_2} \int u(t) dt = \frac{N_1}{N_2} RC u_c(t) \quad 4.4$$

Z toho plyne, že převodní vztah pro magnetickou indukci je

$$B(t) = \frac{RC}{N_2 S_{Fe}} u_c(t) \quad 4.5$$

Převodní vztah pro intenzitu magnetického pole má tvar

$$H(t) = \frac{N_1}{l_{Fe}} i(t) = \frac{N_1}{l_{Fe} R_b} u_b(t) \quad 4.6$$

Kde u_b je napětí měřené na bočníku R_b . [12]

Měření BH křivek lze provádět více způsoby. Jedním z modernějších způsobů je použitím numerické(digitální) integrace. Dále již bude použit termín digitální integrace. Digitální integrace je v LabVIEW reprezentována blokem Time domain math. LabVIEW používá pro integraci následující vzorec:

$$y_i = [x_0 + x_1 + x_2 \dots + x_i] \cdot dt$$

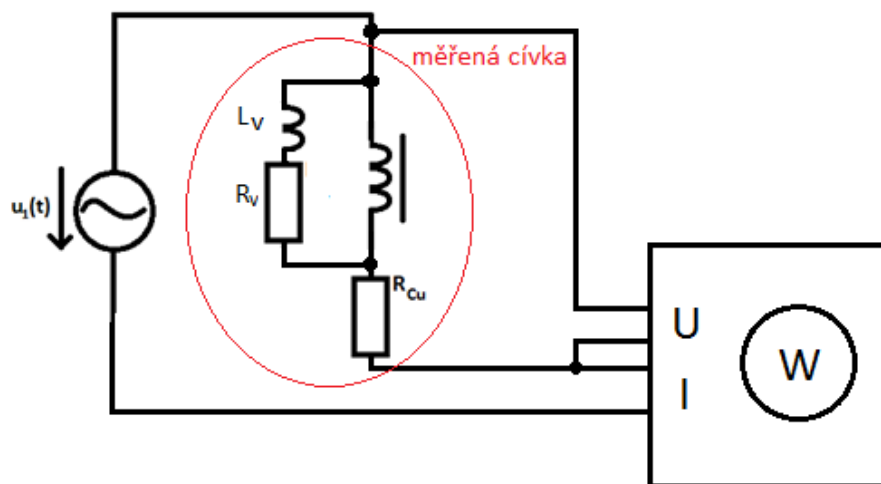
Integrační blok vypočítá integrál pomocí indexu pole jako dt .

Tento blok používá numerickou metodu pro aproximaci integrálu založeného na tomto vzorci. V bloku lze dále zvolit výpočetní mód, kde lze zvolit buďto průběžnou integraci, nebo integraci po segmentech, kdy pro každý nový segment začíná integrace znovu.

5.3 Měření celkových magnetických ztrát

Měření celkových magnetických ztrát provádíme wattmetrem dle uspořádání na obrázku 35. Toto zapojení je vhodné, pokud ověřujeme ztráty na hotové cívce či transformátoru. [12]

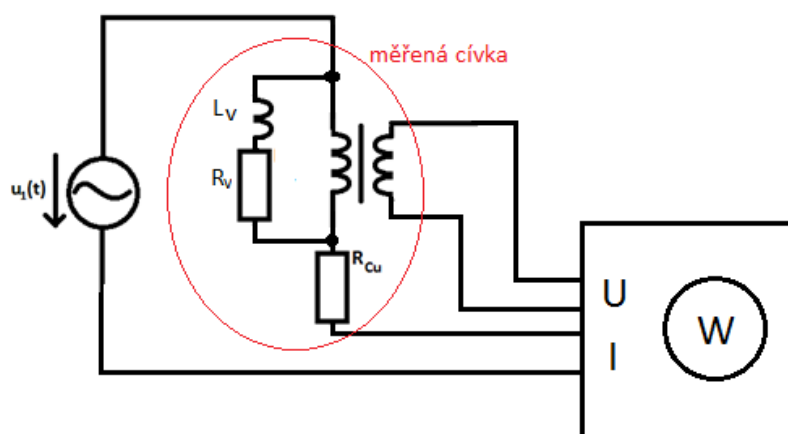
Ztráty v železe se dělá na ztráty hysterezní a na ztráty vířivými proudy. Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Ve feromagnetických materiálech vznikají při změně magnetické indukce B při střídavém magnetování vířivé proudy. Ztráty vířivými proudy závisejí na maximální indukci B_m , frekvenci proudu magnetování f , rezistivitě materiálu, tloušťce r a na konstrukčních úpravách materiálu.



Obrázek 22 – měření celkových magnetických ztrát wattmetrem [12]

Pokud bychom chtěli měřit vlastnosti různých magnetických materiálů (nikoli hotových výrobků), můžeme pracoviště upravit do podoby dle obrázku 36. Pomocné vinutí zde eliminuje ztráty ve vinutí. [12]

Měřený vzorek magnetického materiálu by měl, pokud možno být robustní a větší, aby měl velké, tudíž přesněji měřitelné ztráty. Měřený magnetický obvod může obsahovat vzduchovou mezeru, ale není to příliš vhodné vzhledem k malé indukčnosti, a proto teče velký magnetizační proud. [12]



Obrázek 23 – měření celkových magnetických ztrát wattmetrem. Eliminace ztrát v mědi [12]

6 MĚŘENÍ

Podstatou měření je využít teoretické znalosti získané v předešlých kapitolách a provést praktické měření hysterezních křivek, porovnat a vyhodnotit naměřené hodnoty.

6.1 Měřené vzorky

Měření probíhalo na třech různých vzorcích toroidních transformátorů. Parametry jednotlivých vzorků jsou zobrazeny v tabulce 4 níže.

	N_1	N_2	$S_{Fe} [mm^2]$	$l_{Fe} [m]$	$d_o [m]$	$d_i [m]$	$a \times c [mm]$	$m [kg]$
Vzorek 1	569	20,6	42,25	0,4225	0,1430	0,1300	6,5 x 6,5	0,13520
Vzorek 2	243	50	57	0,3531	0,1199	0,1049	7,6 x 7,5	0,14887
Vzorek 3	246	50	57	0,3534	0,1200	0,1050	7,6 x 7,5	0,15440

Tabulka 2 – parametry toroidních transformátorů

6.2 Popis měření

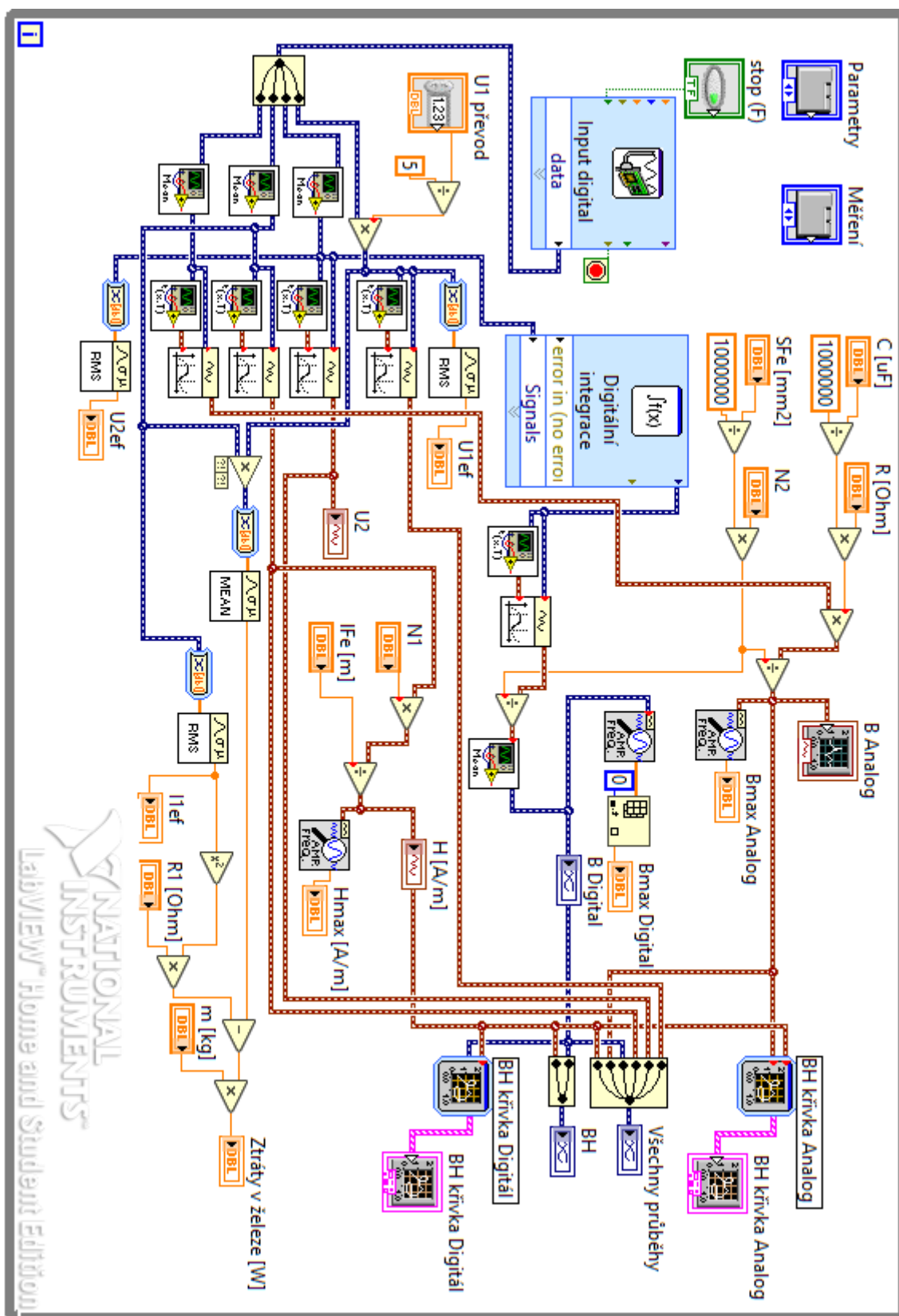
Pro mé první pokusné měření a ověření, zda program pracuje správně, jsem si ze začátku generoval sinusové signály přímo programem LabVIEW a až poté, co vše fungovalo, jak má, jsem přešel na praktické měření, kde jsem již jen nastavil DAQ zařízení a zapojil příslušné přístroje.

Měřicí pracoviště se skládalo ze síťového autotransformátoru, převodníku napětí DEWE-30-8 s převodníky HSI-HV, proudového čidla ITN 12-P Ultrastab, RLC dekády, A/D převodní karty, osobního počítače s vytvořeným programem v LabVIEW a měřených vzorků toroidních transformátorů.

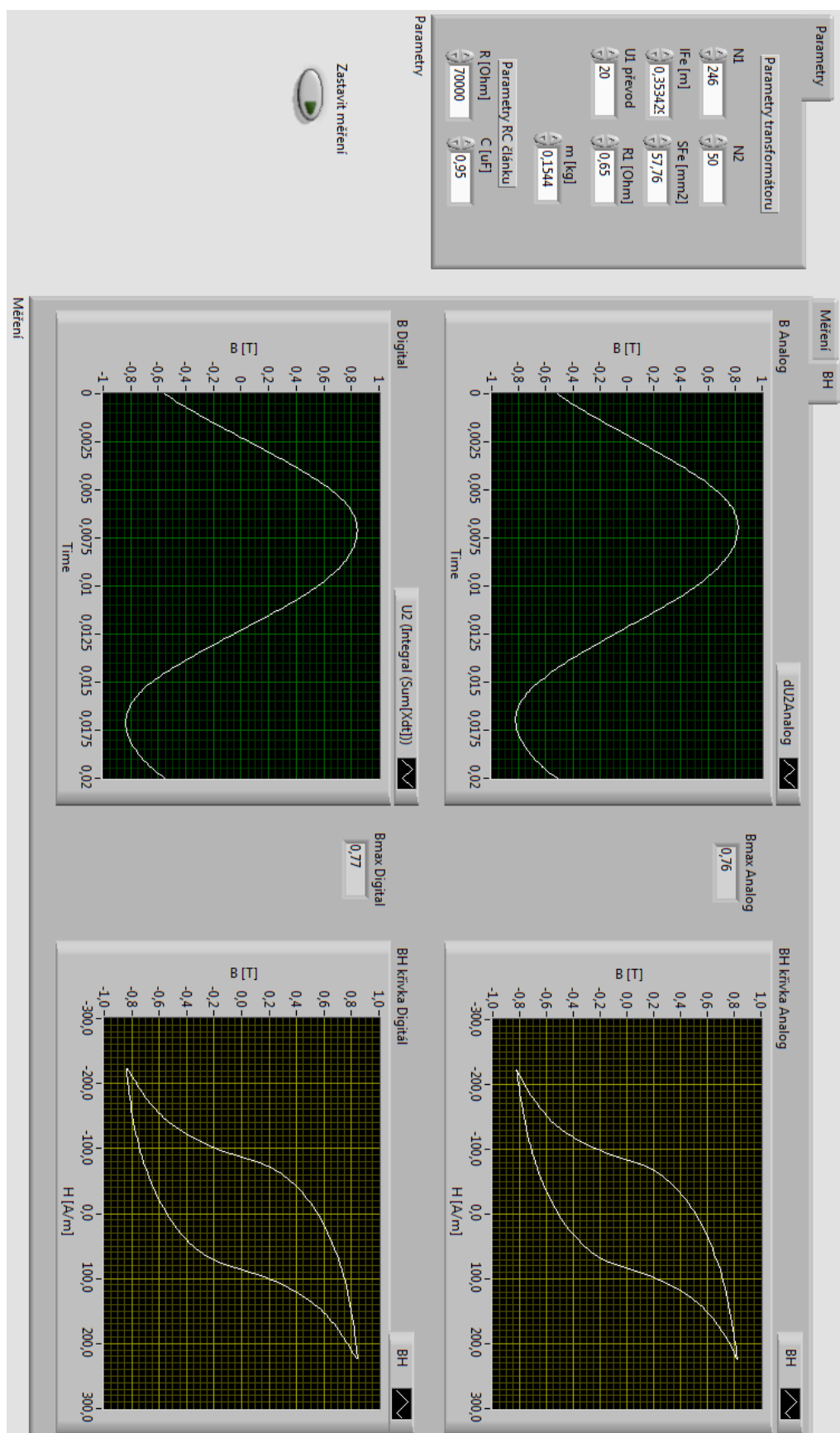
Na všech třech vzorcích byly proměřeny průběhy napětí a proudu pro 5 různých velikostí magnetizačního proudu. Pomocí napětového převodníku bylo převedeno vstupní napětí na primární straně transformátoru na 5 V. Výstupní napětí transformátoru bylo v hodnotách desetin voltů, tudíž nebylo potřeba pro tento průběh používat napětový převodník. Proudové čidlo měřilo magnetizační proud primárním vinutím. Dále byl zapojený analogový RC integrační článek pomocí RLC dekády na výstupu transformátoru. Tyto čtyři průběhy byly pomocí A/D převodní karty převedeny do počítače a byly pomocí programu v LabVIEW dále zpracovány. Tyto průběhy byly také uloženy do TDMS souboru, který lze snadno otevřít například v programu Excel nebo v samotném LabVIEW a dále s ním pracovat. Stejně tak můžete tyto průběhy nalézt uložené na přiloženém CD. Program zobrazuje všechny tyto průběhy, společně s vypočtenou magnetickou indukci a intenzitou magnetického pole. Dále zobrazuje závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole, tedy žádanou BH křivku pro analogovou a digitální integraci, stejně tak jako velikost ztrát v železe.

Na obrázcích 26-40 můžete vidět průběhy hysterezních křivek pro všechny vzorky a nastavené hodnoty proudů.

Čelní panel a blokové schéma měřícího programu lze vidět na obrázku 24 a 25.



Obrázek 24 - Blokový diagram programu pro měření a ukládání dat



Obrázek 25 - Čelní panel programu pro měření a ukládání dat

6.3 Výsledky měření

Po změření hysterezních křivek všech vzorků toroidních transformátorů pro pět hodnot magnetizačního proudu byly signály uloženy a jejich průběhy můžete vidět na obrázcích 26-40. Na obrázku 27 můžete vidět průběh BH křivky při analogovém a digitálním integrování. Ostatní obrázky jsou z důvodu zaměření bakalářské práce jen digitální.

Z obrázku 27 níže lze vidět, že průběh digitálně měřené BH křivky je mnohem hladší než při analogovém měření. Hodnoty intenzity magnetického pole jsou pro oba typy měření stejné, jelikož intenzita je přímo úměrně závislá na magnetizačním proudu, který protéká primárním vinutím. Hodnoty magnetické indukce se lišily maximálně o 30 mT, kdy digitální integrace vždy měřila vyšší hodnoty než analogová. Při nízkých magnetizačních proudech v řádu desetin mA vycházela magnetická indukce stejně jak při analogovém, tak při digitálním měření. Při vyšších magnetizačních proudech se rozdíl výsledných hodnot zvyšoval až do výše zmíněných 30 mT. Tento rozdíl přisuzuji nedokonalosti integračního článku, respektive chybě integračního článku. U integračního článku se to má tak, že při zintegrování signálu se fázi 90° můžeme jen přiblížit, jelikož je funkcí tangens. Tento fázový posun je dán hodnotami RC článku a frekvencí vstupního signálu. Čím více se blížíme 90° , tím vyšší útlum vstupního napětí nastává. Tudíž je tedy nutné najít jakýsi kompromis, kdy se snažíme co nejvíce se přiblížit fázi 90° , ale zároveň potřebujeme takové hodnoty výstupního napětí, aby byly měřitelné s dostatečnou přesností. V LabVIEW tento problém odpadá, jelikož výstupní napětí transformátoru jde namísto integračního článku přímo do převodní A/D karty a dále je zpracováváno digitálně, tudíž při integraci se přiblížíme mnohem blíže 90° , zintegrované napětí bude mnohem menší, ale jelikož už není nutné jej dále analogově převádět, pracuje s ním program jako s čísly, u kterých nevadí, že jsou v řádu desítek mV. To je jeden z důvodů rozdílu hodnot magnetické indukce.

U vzorku číslo 1 můžeme z průběhů hysterezních křivek vidět, že feromagnetické jádro se blížilo stavu nasycení již při magnetizačním proudu 0,5 A. Zřetelně lze vidět tento stav na obrázcích 29 a 30 při vyšších proudech. Na těchto grafech to můžeme pozorovat jako ustálení hodnot magnetické indukce na ose y. Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole již ale nebude docházet ke zvyšování magnetické indukce. U vzorku 2 došlo k dosažení stavu saturace již při proudu kolem 0,7 A. U vzorku 3 docházelo k dosažení plné saturace při přibližně stejném proudu.

Další část měření se týkala měření celkových ztrát v železe. Ztráty v železe pro všechny vzorky a hodnoty magnetizačních proudů jsou zobrazeny v tabulkách 4-6 níže. Výpočet ztrát v železe byl proveden vynásobením signálu vstupního napětí a magnetizačního proudu, poté byla vypočtena střední hodnota tohoto signálu a od ní odečteny Joulovy ztráty, které jsou dány vztahem $\Delta P_{Cu} = R \cdot I_{ef}^2$. Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní křivky. Vzhledem k tomu, že vypočtené ztráty byly vypočtené na kilogram hmotnosti, byly dále tyto hodnoty přepočteny na skutečnou hmotnost transformátoru.

Čím menší je jádro transformátoru, tím poměrově větší ztráty v železe nastávají. Vzorek 1 byl znatelně větší než vzorek 2 a 3, které byly téměř stejné. U vzorku 1 tudíž

docházelo k nejnižším ztrátám v železe. Vzorek číslo 2 a 3 byl dle parametrů téměř identické. Ztráty v železe by tedy měly být velmi podobné. K tomu ale nedochází a vzorek 3 má vyšší ztráty v železe, i když by měl mít z důvodů vyšší hmotnosti a vyššího počtu závitů ztráty nižší. Toto přisuzuji tomu, že na papírovém štítku u transformátoru byla napsána původní změřená hmotnost vzorku, ale dvakrát z něj byly odmotávány závity, ale hmotnost zůstala nepřepsána. Navíc u tohoto vzorku byly vypsány dvě hodnoty závitů primárního vinutí, tudíž jsem musel zvolit jednu z nich. Dalším možným důvodem je nepřesné nastavování magnetizačního proudu, kdy jsem prvně nastavil všechny proudy pro jeden vzorek, poté vzorky vyměnil a proudy nastavoval znovu, takže došlo k nastavení lehce rozdílného proudu.

Tabulka ztrát v železe pro vzorek 1

I_{ef} [A]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP_{Fe} [W/kg]
0,1	0,0103	0,0762
0,2	0,0253	0,1871
0,5	0,0663	0,4904
1	0,1150	0,8506
1,5	0,1789	1,3232

Tabulka 3 - celkové ztráty v železe (vzorek 1)

Tabulka ztrát v železe pro vzorek 2

I_{ef} [A]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP_{Fe} [W/kg]
0,1	0,0035	0,0235
0,2	0,0153	0,1028
0,5	0,0578	0,3883
1	0,1410	0,9471
1,5	0,2445	1,6424

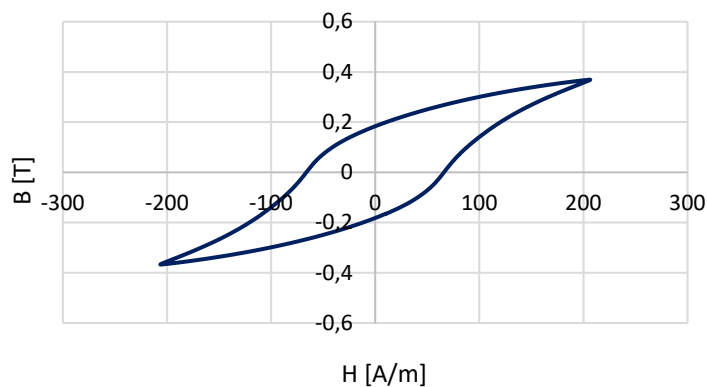
Tabulka 4 - celkové ztráty v železe (vzorek 2)

Tabulka ztrát v železe pro vzorek 3

I_{ef} [A]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP_{Fe} [W/kg]
0,1	0,0139	0,0900
0,2	0,0432	0,2798
0,5	0,0988	0,6399
1	0,1853	1,2001
1,5	0,2887	1,8698

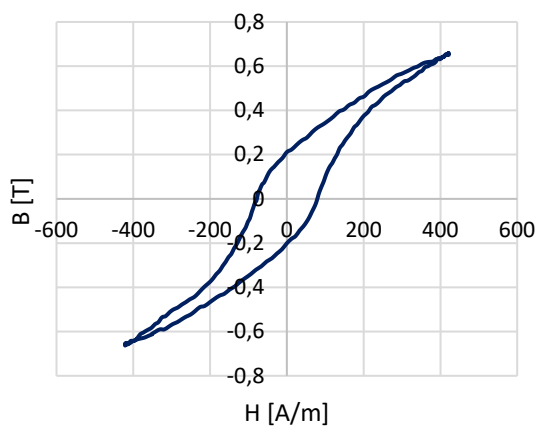
Tabulka 5 - celkové ztráty v železe (vzorek 3)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,1$ A (vzorek 1)

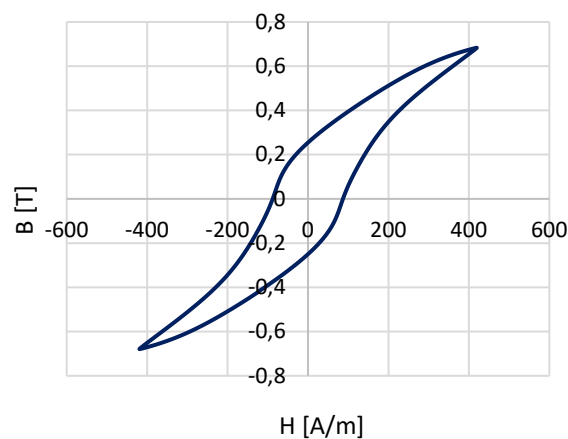


Obrázek 26 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,1$ A (Vzorek 1)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (vzorek 1)

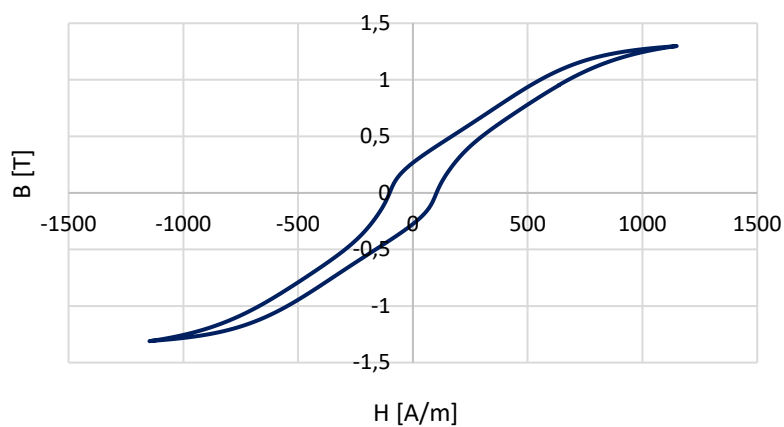


BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (vzorek 1)



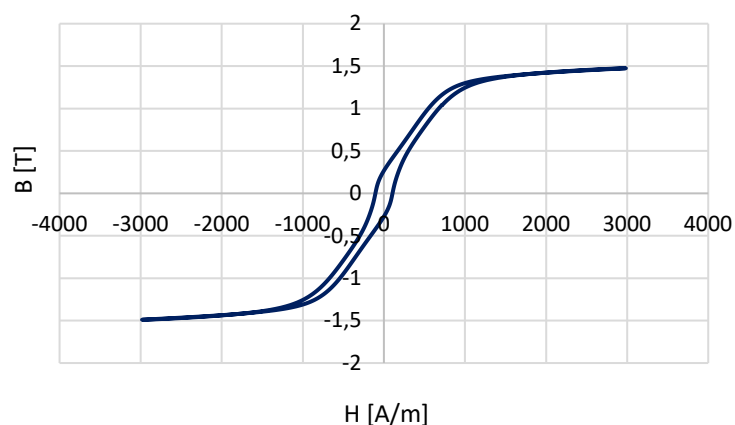
Obrázek 27 – Analogová a digitální BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (Vzorek 1)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (vzorek 1)



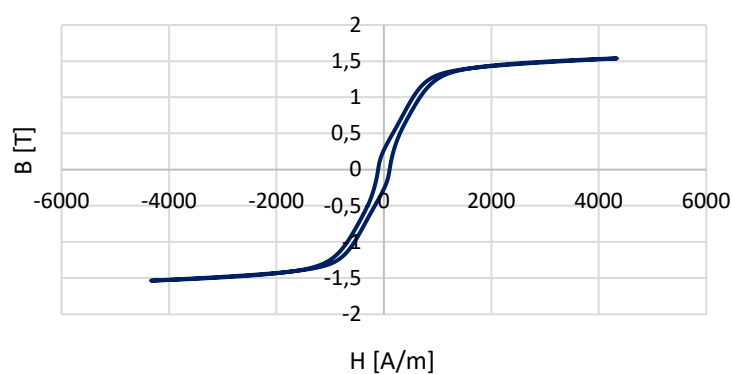
Obrázek 28 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (Vzorek 1)

BH křivka pro $I_{ef} = 1 \text{ A}$ (vzorek 1)



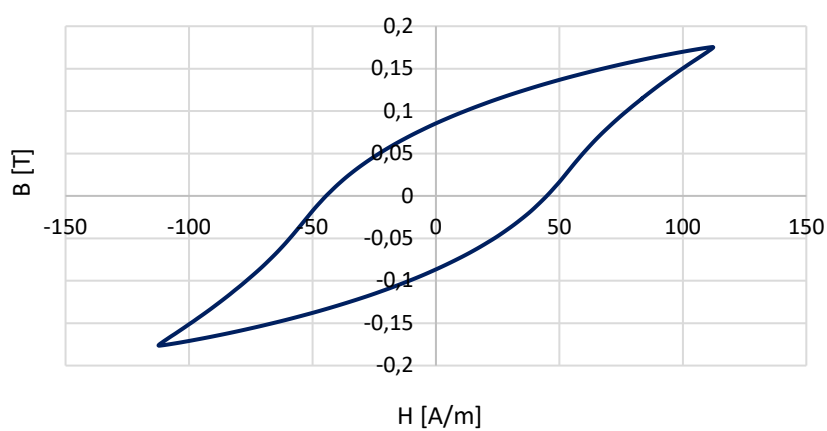
Obrázek 29 – BH křivka pro $I_{ef} = 1 \text{ A}$ (Vzorek 1)

BH křivka pro $I_{ef} = 1,5 \text{ A}$ (vzorek 1)



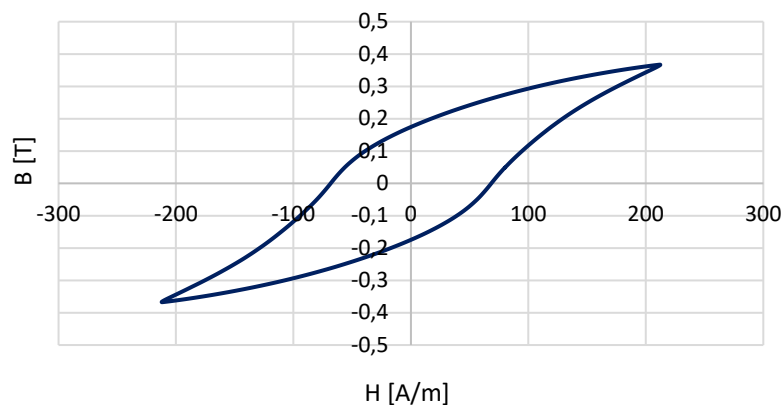
Obrázek 30 – BH křivka pro $I_{ef} = 1,5 \text{ A}$ (Vzorek 1)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,1 \text{ A}$ (vzorek 2)



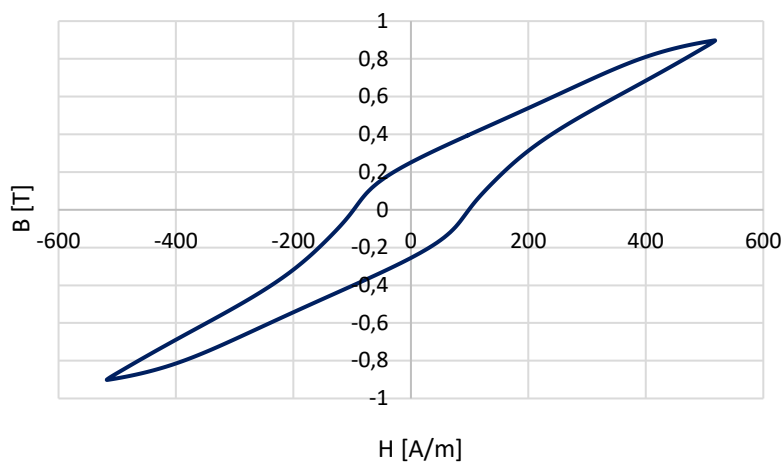
Obrázek 32 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,1 \text{ A}$ (Vzorek 2)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (vzorek 2)



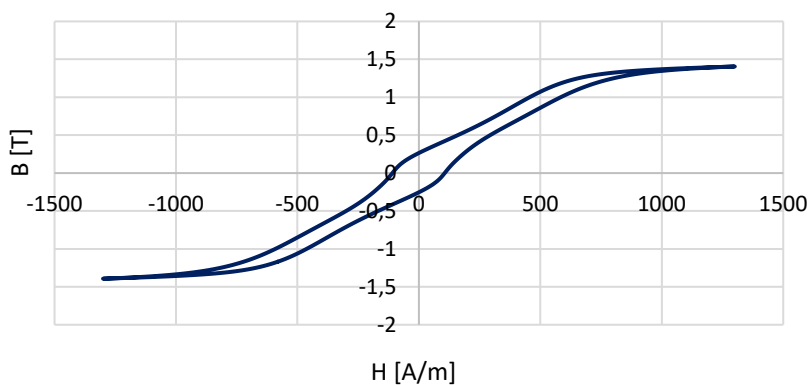
Obrázek 31 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (Vzorek 2)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (vzorek 2)



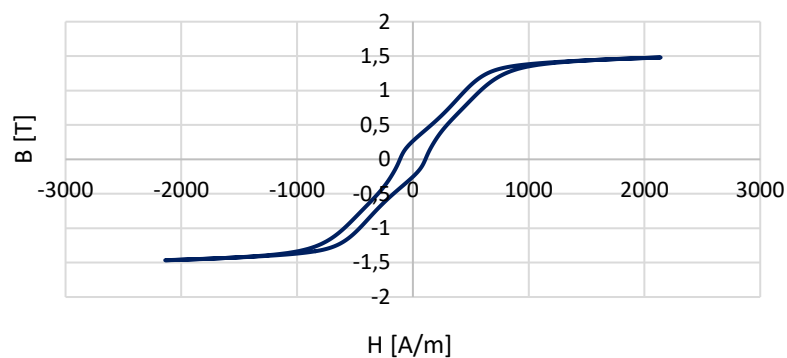
Obrázek 33 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (Vzorek 2)

BH křivka pro $I_{ef} = 1$ A (vzorek 2)



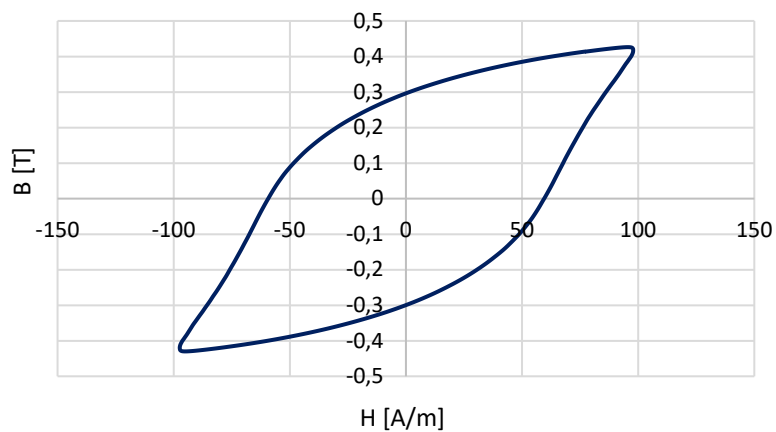
Obrázek 34 – BH křivka pro $I_{ef} = 1$ A (Vzorek 2)

BH křivka pro $I_{ef} = 1,5$ A (vzorek 2)



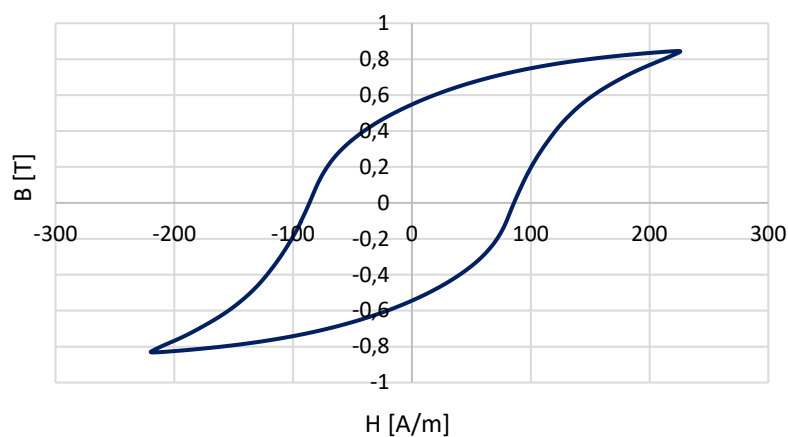
Obrázek 36 – BH křivka pro $I_{ef} = 1,5$ A (Vzorek 2)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,1$ A (vzorek 3)



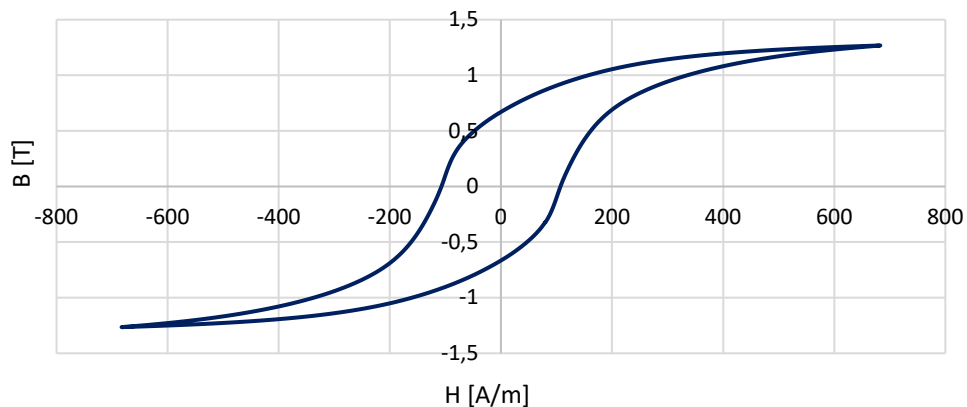
Obrázek 35 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,1$ A (Vzorek 3)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (vzorek 3)



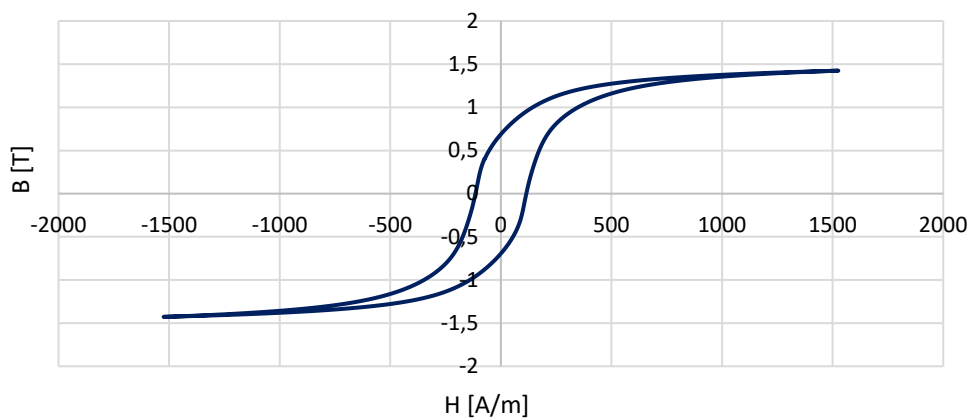
Obrázek 37 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,2$ A (Vzorek 3)

BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (vzorek 3)



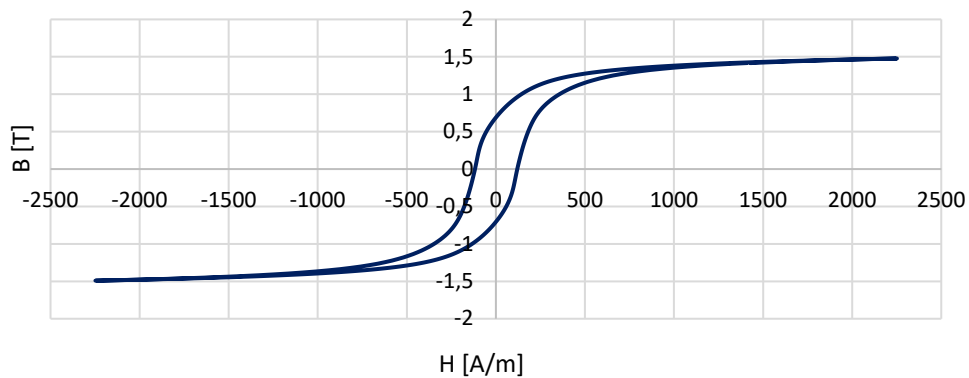
Obrázek 38 – BH křivka pro $I_{ef} = 0,5$ A (Vzorek 3)

BH křivka pro $I_{ef} = 1$ A (vzorek 3)



Obrázek 39 – BH křivka pro $I_{ef} = 1$ A (Vzorek 3)

BH křivka pro $I_{ef} = 1,5$ A (vzorek 3)



Obrázek 40 – BH křivka pro $I_{ef} = 1,5$ A (Vzorek 3)

7 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl představen program LabVIEW, ukázány základy jeho uživatelského prostředí. Poté zde byla popsána metoda získávání digitálního signálu pomocí DAQ zařízení a LabVIEW software.

Dále bylo provedeno podrobné rozdělení aktuálně používaných typů čidel proudu. Tato rešerše zahrnuje typy čidel využívající Hallovu sondu, Fluxgate technologii, Rogowskiho cívku, měřicí transformátory, a nakonec použití bočníkového odporu. Čidlo, které jsem použil na měření, je popsáno více podrobněji. U čidel byly popsány jejich vlastnosti, popřípadě výhody či nevýhody.

Následovalo popsání integračních RC a RL článků, jejich fázová charakteristika a logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika. Zároveň s tím bylo rozebráno, co je to hysterezní křivka a její části. Popsána byla i neméně důležitá magnetická remanence a jevy s ní spojené. Poté jsou rozebrány způsoby měření BH křivek a obecné zapojení pracoviště pro jejich měření.

Další část byla věnována teorii měření celkových magnetických ztrát. Byla zde popsána schémata pro měření hotových cívek či transformátorů a pro měření vlastností různých magnetických materiálů (nehotových výrobků).

Poté byl představen program pro měření a vyhodnocení měření, který získal data pomocí DAQ zařízení a poté z těchto dat byly zpracovány signály a zobrazeny BH křivky. Průběhy těchto křivek pro pět hodnot magnetizačního proudu u třech vzorků toroidních transformátorů byly poté uloženy a dále zobrazeny. Pro jednu hodnotu magnetizačního proudu bylo uvedeno porovnání BH křivky při analogové a digitální integraci.

V další části jsem měřil ztráty v železe pro všechny vzorky a hodnoty magnetizačního proudu. Tyto výsledky jsem dále porovnal s teoretickými a vysvětlil možné důvody nepřesného měření a rozdílných výsledků.

Měření BH křivek je důležité pro určování parametrů feromagnetických materiálů. Lze z jejich průběhů zjistit maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Lze také zjistit, při jakých hodnotách magnetizačního proudu dochází k saturaci a následnému přesycování jádra, což je také důležitým ukazatelem vlastností feromagnetického materiálu. Při měření lze také určit velikosti celkových magnetických ztrát z průběhů vstupního napětí a magnetizačního proudu. Všechny tyto parametry jsou velmi důležité pro správný návrh feromagnetických materiálů a návrh izolace.

LITERATURA

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] *Industry Current & Voltage Transducers* [online]. www.lem.com [cit. 2016-12-26].
Dostupné z: http://www.lem.com/images/stories/files/Markets/Industry/cae130621_1_web.pdf
- [3] *Isolated current and voltage transducers Characteristics - Applications - Calculations 3rd Edition* [online]. www.lem.com [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: http://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/CH24101E.pdf
- [4] *Current sensors, Voltage sensors* [online]. ABB Entrelec [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: [http://www02.abb.com/global/atabb/atabb104.nsf/0/4b9d658ae545650dc1257475002cd988/\\$file/Elektronische Strom Spannungswandler.pdf](http://www02.abb.com/global/atabb/atabb104.nsf/0/4b9d658ae545650dc1257475002cd988/$file/Elektronische%20Strom%20Spannungswandler.pdf)
- [5] PEPKA, Gary. *Position and Level Sensing Using Hall Effect Sensing Technology* [online]. Allegro MicroSystems, 2003 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Technical-Documents/AN295044-Position-and-Level-Sensing-Using-Hall-Effect-Sensing-Technology.ashx?la=en>
- [6] LEM Danfysik. *High Performance Current Transducer ITN 12-P Ultrastab* [online]. www.lem.com [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/itn%2012-p%20ultrastab.pdf>
- [7] *What is a Rogowski Coil?* [online]. 2013 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>
- [8] *4M Protective and Measuring Transformers* [online]. w3.siemens.com, 2009 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/sitecollectiondocuments/en/mv/indoor-devices/protective-measuring-transformers-m4/catalogue-protective-and-measuring-transformers-m4_en.pdf
- [9] *Current Shunt Resistors* [online]. 2004 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.rc-electronics-usa.com/current-shunt.html>
- [10] REICHL, Jaroslav Reichl a Martin VŠETIČKA. *Integrační článek* [online]. 2006 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1369-integracni-clanek>
- [11] AspenCore. *Electronics Tutorials: Magnetic Hysteresis* [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.htm>
- [12] PATOČKA DOC. DR. ING., Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem* [online]. 2005 [cit. 2017-05-18].

PŘÍLOHY

Příloha 1. Měřené vzorky toroidních transformátorů



Obrázek 41 - Měřený vzorek toroidního transformátoru



Obrázek 42 - Měřený vzorek toroidního transformátoru



Obrázek 43 - Měřený vzorek toroidního transformátoru

Příloha 2. CD s programem a uloženými průběhy